MODELOS DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA UM SISTEMA DE GESTÃO DE RODOVIAS ESTADUAIS DO CEARÁ

Sérgio Armando de Sá e Benevides

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

_____
Profª Laura Maria Goretti da Motta, D. Sc.

_____
Prof. Jacques de Medina, L. D.

_____
Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.

_____
Prof. José Leomar Fernandes Jr, D.Sc.

_____
Prof. Luiz Francisco Muniz da Silva, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2006

BENEVIDES, SÉRGIO ARMANDO DE SÁ E

Modelos de desempenho de pavimentos asfálticos para um sistema de gestão de rodovias estaduais do Ceará [Rio de Janeiro] 2006

XXIV, 357 p., 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2006).

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1.Defeitos.

2.Gerência de Pavimentos.

3. Modelos.

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa a quem é o centro da minha vida.
Aquele que me deu o Dom da vida.
Aquele que me deu Força, Paciência e Perseverança
para concluir esta tese.
Aquele que segue os meus passos, me protege
e é infinitamente misericordioso comigo,
DEUS.

SENHOR EU TE LOUVO E TE AGRADEÇO

...pois vos é necessária a perseverança para alcançardes os bens prometidos...
(Hebreus 10, 36)

À Maria Inês, esposa amada, aos meus queridos filhos Inês Carolina/Vicente, Sérgio Filho/Luciana, Ana Cíntia/Lúcio e Paulo José/Camila e aos meus lindos netinhos Vicente, Lucas, João, Carolina, Paulo Filho e Maria com todo meu amor.

Agradecimentos especiais à minha mãe Zoraida e a minha sogra Maria Alice.

Às memórias do meu saudoso pai Paulo Benevides, do meu irmão Paulo Benevides Filho e do meu sogro José Oriá Serpa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente a todos aqueles que, direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste trabalho. De maneira particular, expresso minha gratidão:

- A minha orientadora Profª Dra. Laura Maria Goretti da Motta, pela paciência, estímulo, amizade, dedicação, ensinamentos e empenho inestimáveis;
- Aos professores Jacques de Medina, Jorge Barbosa Soares, José Leomar Fernandes Jr. e Luiz Francisco Muniz da Silva pelo incentivo, idéias e conselhos além da participação na banca examinadora;
- Agradecimento especial aos colegas engenheiros Carlos Roberto Cunha e Carlos André Pontes pela imprescindível ajuda nos levantamentos de campo;
- A REDE DE ASFALTO N/NE, com apoio da FINEP/CNPq e Petrobrás, que possibilitou a aquisição do equipamento a laser usado nesta pesquisa;
- Aos colegas de doutorado Franklin Chaves e Rodrigo Barella pelos conselhos, troca de idéias e discussões técnicas;
- Aos colegas professores do Departamento de Engenharia de Transportes da UFC – DET, Felipe Loureiro, Mário Azevedo Filho, João Alencar, Lucas Tadeu de Melo e Fernando Beserra pelo incentivo e apoio.
- Aos colegas professores e aos funcionários do DET da UFC pelo estímulo;
- Aos graduandos do curso de engenharia civil Adriano Duarte, Newton Montezuma e Henrique Silva pela imprescindível ajuda na formatação das figuras e nos dados de estatística.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

MODELOS DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA UM SISTEMA DE GESTÃO DE RODOVIAS ESTADUAIS DO CEARÁ

Sérgio Armando de Sá e Benevides

Dezembro / 2006

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Programa: Engenharia Civil

Os modelos de previsão de desempenho são os elementos-chave em um Sistema de Gerência de Pavimentos e são ferramentas importantes que possibilitam um planejamento mais adequado das ações futuras. Este estudo teve como principal objetivo, desenvolver modelos probabilísticos e estatísticos de previsão de desempenho de pavimentos para um Sistema de Gestão de rodovias estaduais do Ceará, considerando 72 trechos desta malha. Nos modelos probabilísticos foram utilizadas as matrizes de probabilidade de transição de Markov, tendo como base os dados retirados das opiniões de técnicos especialistas para a determinação do Índice de Condição do Pavimento – ICP, estimando a condição futura a partir da condição atual. Nos modelos estatísticos, baseados em equações de regressão, foram correlacionados os valores do Índice Internacional de Irregularidade – IRI, obtidos com o perfilômetro inercial a laser com três sensores, com os defeitos/severidades obtidos no levantamento visual contínuo – LVC, com a deflexão, com o número estrutural corrigido e com o ICP. Uma equação de previsão de evolução das irregularidades em função do PCI, Índice de condição de Pavimentos composto, foi também correlacionada com um dos modelos obtidos neste estudo. Os resultados apresentaram uma correlação aceitável entre os valores do IRI e do PCI dos trechos estudados. O *software* HDM 4 foi usado para estudos de previsão de evolução da irregularidade longitudinal em alguns trechos e também para a análise econômica em um desses trechos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

PERFORMANCE MODELS OF ASPHALT PAVEMENTS FOR A MANAGEMENT SYSTEM IN STATE ROADS OF CEARÁ

Sérgio Armando de Sá e Benevides

December/2006

Advisor: Laura Maria Goretti da Motta

Program: Civil Engineering

Performance models have become key elements in Pavement Management Systems. They are important tools for planning future pavement maintenance initiatives. The objective of this study is to develop probabilistic and statistic models for the prediction of pavement performance for a management system in state roads of Ceará. Seventy two subsections, of the state road network, were selected. The values of Pavement Condition Index – PCI were determined subjectively. Probabilistic models based on the Markov transition process and on the opinions collected from specialists were used to estimate pavement future conditions from initial conditions. In the statistic models, based on regression equations, the values of the International Roughness Index – IRI of the pavements investigated, measured with an inertial laser perfilometer with 3 (three) sensors, were correlated with the distress/severity obtained in Pavement Condition and Inventory Surveys (visual observations), with the deflection and with the modified structural number. An equation for irregularity evolution as a function of the PCI developed by DEWAN and SMITH, 2002, was also correlated to one of the models obtained in the present study. The results indicated an acceptable correlation between IRI and PCI for the sections studied. The HDM 4 software was used to predict the evolution of IRI in some sections, and in one of them an economic analysis was also performed.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS xii

LISTA DE TABELAS xix

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

1.1. Considerações Preliminares 1

1.2. Objetivos da Pesquisa 5

1.3. Metodologia 6

1.4. Desenvolvimento do Trabalho 7

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 9

2.1. Visão Geral de um Sistema de Gerência de Pavimentos 9

2.1.1. Conceitos, Objetivos, Divisão e Implementação 9

2.1.2. Sistema de Gerência de Pavimento em Nível de Rede 16

2.1.3. Sistema de Gerência de Pavimento em Nível de Projeto 25

2.1.4. Implementação de um Sistema de Gerência de Pavimentos 27

2.2. Avaliação de Pavimentos 39

2.2.1. Generalidades 39

2.2.2. Levantamento de Defeitos 44

2.2.3. Danos Causados aos Pavimentos pela Água 45

2.2.4. Avaliação de Defeitos 47

2.2.5. Descrição de Defeitos 50

2.2.6. Métodos para Avaliação de Defeitos 53

2.2.7. Índices de Defeitos 55

2.2.8. Avaliação Estrutural 59

2.3. Irregularidade Longitudinal 68

2.3.1. Generalidades 68

2.3.2. Perfis 72

2.3.3. Equipamentos de Medição das Irregularidades 75

2.3.4. Escalas de Medição das Irregularidades Longitudinais 86

2.3.5. Calibração dos Equipamentos 92

2.4. Modelos de Previsão de Desempenho 93

2.4.1. Serventia e Desempenho 93

2.4.2. Desenvolvimento de Modelos de Desempenho 94

2.5. Modelos do Programa HDM 110

2.5.1. Antecedentes Históricos 110

2.5.2. Estrutura de Dados do HDM III 112

2.5.3. Objetivos do Desenvolvimento do Sistema HDM-4 113

2.5.4. O Papel do Sistema HDM-4 na Gestão de Rodovias 114

2.5.5. Conceito Estrutural do HDM 4 117

2.5.6. Modelos de Previsão de Desempenho do Programa HDM 123

CAPÍTULO 3 - ASPECTOS GERAIS E AMBIENTAIS DO ESTADO DO CEARÁ 131

3.1. Considerações Iniciais 131

3.2. Aspectos Pluviométricos, de Clima e Condições Ambientais 132

3.2.1. Considerações Climáticas da Região Nordeste 133

3.3. Aspectos Geológicos do Estado do Ceará 136

3.3.1. Fenômenos de Risco e Áreas em Processo de Degradação 136

3.3.2. Unidades Geológicas do Estado do Ceará 138

3.4. Aspectos Geomorfológicos do Estado do Ceará 141

3.4.1. Fundamentos Geológicos do Relevo 141

3.5. Aspectos Pedológicos do Estado do Ceará 141

3.6. Distribuição das Precipitações 143

3.7. Aspectos Litológicos da Paisagem Cearense 146

CAPÍTULO 4 - O SISTEMA DE GESTÃO E DADOS DISPONÍVEIS DA MALHA VIÁRIA DO DERT-CE 150

4.1. Histórico do Sistema de Gestão 150

4.2. O SGP do DERT 152

4.2.1 Informações Gerais 152

4.2.2 Composição do SGP do DERT 155

4.3 Detalhamento das Equações de Evolução 158

4.4 Levantamentos Efetuados no SGP/DERT 160

4.4.1 Levantamento de Irregularidade Longitudinal 160

4.4.2 Levantamento Visual Contínuo 162

4.4.3 Levantamento Deflectométrico 164

4.5 Dados Gerais Sobre a Malha Viária Estadual do Ceará 168

4.6 Banco de dados do SIGMA do DERT-CE 169

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E ANÁLISE DOS LEVANTAMENTOS DOS TRECHOS ESCOLHIDOS NESTA PESQUISA 170

5.1. Geomorfologia da Região Metropolitana de Fortaleza 170

5.2. Condições Climáticas, Pluviométricas e Térmicas da RMF 177

5.3. Dados Gerais de Alguns Trechos desta Pesquisa 179

5.3.1. Determinação do número N de Projeto 180

5.3.2. Características Físicas, de Projeto, dos Revestimentos Asfálticos e das Camadas Granulares 180

5.4. Levantamentos Efetuados nos Trechos desta Pesquisa..... 181

5.4.1. Procedimentos e Resultados do Levantamento Visual Contínuo - LVC 181

5.4.2. Resultados dos Dados dos Trechos Originados das Opiniões de Técnicos Especialistas 190

5.4.3. Levantamento das Irregularidades Longitudinais e Afundamentos..... 195

5.4.4 A Operação de Campo com o *Ciberlaser* 199

5.4.5 Procedimento para o Cálculo do IRI 203

5.4.6 Levantamentos Efetuados com o Perfilômetro a Laser nesta Pesquisa..... 205

5.4.7 Determinação do Número Estrutural Corrigido dos Trechos em Estudo..... 218

CAPÍTULO 6 - MODELOS DE DESEMPENHO E ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS COM OS MODELOS DO HDM 4..... 222

6.1. Introdução 222

6.2. Modelos Probabilísticos 223

6.2.1 Considerações Iniciais 223

6.2.2 Resultados e Análises dos Modelos Probabilísticos dos Trechos desta Pesquisa 224

6.2.3 Análise das Estratégias de M&R em Função do ICP..... 230

6.3 Modelos Estatísticos 231

6.3.1. Equações de Evolução dos Defeitos/Severidades pelo LVC..... 231

6.3.2. Modelos de Correlação entre os Valores do IRI Medidos com o Perfilômetro a Laser..... 239

6.3.3. Modelos Correlacionando os Valores do IRI, com os Defeitos do LVC, com o ICP, com a Deflexão e o Número Estrutural Corrigido..... 245

6.4 Evolução do IRI em Função do ICP nos 72 Trechos desta Pesquisa..... **261**

6.5 Evolução do IRI Utilizando o HDM 4..... 267

6.5.1 Resultados e Análise da Evolução do IRI no Trecho Escolhido na CE 040 268

6.5.2 Resultados e Análise da Evolução do IRI no Trecho Escolhido na CE 060 270

6.5.3 Resultados e Análise da Evolução do IRI no Trecho Escolhido na CE 085 271

6.6 Indicadores Econômicos de um dos Trechos deste Estudo pelo HDM 4..... 272

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... 280

7.1. Conclusões 280

7.2. Observações Finais..... 283

7.3. Recomendações para Futuras Pesquisas 284

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 286

GLOSSÁRIO 303

ANEXO I..... 312

ANEXO II 324

ANEXO III..... 329

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Evolução da abrangência das funções de um Sistema de Gerência de Pavimentos adaptada de KULKARNI & MILLER (2003). 10

Figura 2.2. Tendências de previsão de desempenho de pavimentos, adaptada de KULKARNI & MILLER (2003)..... 11

Figura 2.3. Principais atividades de um SGP (SILVA, 2002).. 15

Figura 2.4. Fluxograma de um sistema de gerência de pavimentos, modificada de HAAS et al., (1994). 15

Figura 2.5. Fluxograma de um SGP com alternativas das estratégias de M&R (FERNANDES, JR. et al., 2003)..... 27

Figura 2.6. Inter-relação entre Índice de Serventia, e a vida útil do pavimento e o efeito causado pela postergação na aplicação das atividades de manutenção (adaptado de HAAS &HUDSON, 1978). 29

Figura 2.7. Principais Dados de Saída de uma Avaliação de Pavimentos para Análise de Desempenho e Análise Econômica (adaptado de HAAS & HUDSON, 1978). 38

Figura 2.8. Curvas típicas de deformação permanente incluindo os efeitos de ingresso de água nas trincas e de manutenção (modificada de PATERSON, 1987). ... 50

Figura 2.9. Afundamento de trilha de roda por deficiência de compactação (CHAVES et al., 2004). 51

Figura 2.10. Revestimento em TSS, aparecendo o seixo rolado da base (CHAVES et al., 2004). 52

Figura 2.11. Surgimento de pequenas panelas, por evolução do desgaste da figura anterior 2.11 (CHAVES et al., 2004). 52

Figura 2.12. Inter-relacionamento entre a ocorrência de defeitos devido ao revestimento, suas causas, evoluções e serviços de conservação..... 52

Figura 2.13. Seleção de atividades de manutenção e reabilitação em função da variação do Índice de Condição do Pavimento (ICP) ao longo do tempo (adaptada de HICKS et al., 1999)..... 57

Figura 2.14. Posicionamento da Viga Benkelman (DNER ME 024/94)..... 62

Figura 2.15. Ensaio com o deflectômetro de impacto (FWD). 64

Figura 2.16. Perfis longitudinais e transversais (adaptada de SAYERS & KARAMIHAS, 1998). 73

Figura 2.17. Ondulação Longitudinal e Transversal (adaptada de YODER & WITCZAK, 1975). 74

Figura 2.18. Respostas do veículo as diferentes irregularidades de comprimento de onda em altas e baixas velocidades, (modificada de SAYERS & GILLESPIE, 1983, apud FARIAS & SOUSA, 2002). 75

Figura 2.19. Método estático nível e mira, (adaptada de SAYERS & KARAMIHAS, 1998). 77

Figura 2.20. Esquema de um Dipstick (modificada de SAYERS & KARAMIHAS, 1998). 78

Figura 2.21. Ilustração de um Dipstick em operação (KARAMIHAS, 2004)..... 78

Figura 2.22. Esquema do Perfilômetro CHLOE utilizado no AASHO Road Test, (adaptada de HAAS et al., 1994). 79

Figura 2.23. Componentes básicos do Merlin, CASSANIGA & MACHADO FILHO (2002)..... 80

Figura 2.24. Esquema do perfilômetro APL (modificada de HAAS et al., 1994). 81

Figura 2.25. Parte de um SMITR conhecido como Integrador IPR/USP (DOMINGUES, 2003) 82

Figura 2.26. Esquema do equipamento do tipo resposta, Maysmeter. 83

Figura 2.27. Esquema do Perfilômetro do TRRL (adaptado de HAAS et al.,1994)..... 84

Figura 2.28. Modelo de quarto de carro (QUEIROZ, 1984 adaptada de MEDINA, 1997). 87

Figura 2.29. Escala de limites da variação da irregularidade em vários países (FARIAS & SOUZA, 2002)..... 91

Figura 2.30. Conceito de serventia-desempenho (modificada de HAAS et al., 1994). 93

Figura 2.31. Diagrama de blocos dos principais componentes do projeto de pavimentos (adaptada de HAAS & HUDSON, 1978)..... 96

Figura 2.32. Evolução dos trincamentos dos pavimentos, de acordo com a equação 2.34 (GEIPOT, 1981). 103

Figura 2.33. Exemplo de uma matriz de probabilidade de transição para 10 níveis de estado. 109

Figura 2.34. Esquema dos modelos Bilinear e Linear do modelo HDM 4 (LERCH, 2002). 130

Figura 3.1. Balanço hídrico de cidades brasileiras (MEDINA, 1997). 135

Figura 3.2. Mapa geológico do Estado do Ceará (IPLANCE, 1997)..... 139

Figura 3.3. Predominância de Solos do Estado do Ceará..... 143

Figura 3.5. Mapa da Precipitação Média Anual do Estado do Ceará (IPLANCE, 1997)..... 145

Figura 3.6. Litologia do Estado Ceará × Rodovias (adaptada de IPLANCE, 1997 & DERT, 2003) 147

Figura 4.1. Informações administradas pelo SGP-DERT..... 153

Figura 4.2. Tela do sistema de informação on-line do SGP-DERT, sobre o estado de conservação da pista. 153

Figura 4.3. Equipamento da ROMDAS BI instalado em um veículo (site da ROMDAS) 160

Figura 4.4. Interior de um veículo equipado com instrumentos adequados para o LVC (ENGEFOTO, 2002)..... 162

Figura 4.5. Escolha e registro da maior severidade..... 164
Figura 4.6. Levantamento e cadastramento de dois defeitos diferentes. 164
Figura 4.7. Vista externa do FWD (ENGEFOTO, 2002). 165
Figura 4.8. Detalhe da cabine do veículo para operação do FWD (ENGEFOTO, 2002)..... 165
Figura 4.9. Esquema de carga do FWD (ENGEFOTO, 2002). 166
Figura 4.10. Condição da malha viária estadual do Ceará em 2002/2003 (DERT, 2003). 168
Figura 4.11. Condição da malha viária estadual do Ceará em 2005 (ENGEVIAS, 2006)..... 169
Figura 5.1. Localização dos trechos desta pesquisa na RMF 171
Figura 5.2. Distribuição da precipitação na RMF (FUNCEME, 1974-1993) 177
Figura 5.3. Distribuição de temperaturas na RMF (FUNCEME, 1974-1993) 178
Figura 5.4. Distribuição da umidade relativa do ar na RMF (FUNCEME, 1974-1993). 178
Figura 5.5. Distribuição da insolação total na RMF (FUNCEME, 1974-1993)..... 178
Figura 5.6. Distribuição da evaporação na RMF (FUNCEME, 1974-1993)..... 179
Figura 5.7. Distribuição de precipitação versus evaporação RMF (FUNCEME,1974-1993) 179
Figura 5.8. Dias de chuva na RMF (FUNCEME, 1974-1993) 179
Figura 5.9. Tela inicial para o LVC..... 183
Figura 5.10. Tela de identificação do trecho para o LVC 183
Figura 5.11. Exemplo de tela de início do levantamento de um dos trechos escolhidos 090ECE0010 184
Figura 5.12. Avaliação da condição (ICP) como um indicador geral do tipo de intervenção 191
Figura 5.13. Matriz de transição para os revestimentos em CBUQ..... 192
Figura 5.14. Matriz de transição para os revestimentos em AAUQ 193

Figura 5.15. Matriz de transição para os revestimentos em TSD 193

Figura 5.16. Ilustrando o equipamento a laser e a disposição dos sensores na traseira do veículo na posição considerada normal 196

Figura 5.17. Princípios de funcionamento de um módulo laser 197

Figura 5.18. Tela do Software *Ciberlogger*..... 200

Figura 5.19. Tela inicial do *Cibershell*..... 200

Figura 5.20. Geração de relatórios com os cálculos do IRI, afundamento e perfil..... 200

Figura 5.21. Disposição dos sensores fixados na traseira do veículo, no LD..... 207

Figura 5.22. Disposição dos sensores fixados na traseira do veículo, no LE..... 208

Figura 5.23. Curva de desempenho estrutural de um pavimento por medidas de deflexão (PRO 10 e PRO 11). 219

Figura 6.1. Resultados do processo de Markov, trecho 085ECE170D em TSD. 227

Figura 6.2. Resultados do processo Markov, trecho 341ECE0010E em AAUQ..... 228

Figura 6.3. Resultados processo de Markov, trecho 060ECE0150D em CBUQ..... 229

Figura 6.4. Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito TF em 44 trechos da RMF considerando os três tipos de revestimento 233

Figura 6.5. Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito TB em 44 trechos da RMF considerando os três tipos de revestimento 234

Figura 6.6. Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito REM em 44 trechos da RMF considerando os três tipos de revestimento 234

Figura 6.7. Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito AFUND em 44 trechos da RMF considerando os três tipos de revestimento 234

Figura 6.8. Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito DES em 44 trechos da RMF considerando os três tipos de revestimento 235

Figura 6.9. Gráfico com a equação de evolução e o R^2 considerando toda a porcentagem da extensão trincada (TF + TB) em 44 trechos da RMF considerando os três tipos de revestimento..... 235

Figura 6.10. Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito TF em 32 trechos da RMF com revestimento em CBUQ..... 238

Figura 6.11. Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito REM em 32 trechos da RMF com revestimento em CBUQ..... 238

Figura 6.12. Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito TF em 10 trechos da RMF com revestimento em TSD..... 239

Figura 6.13. Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito REM em 10 trechos da RMF com revestimento em TSD..... 239

Figura 6.14. Disposições dos sensores nos levantamentos efetuados para a medição do IRI nesta pesquisa. 240

Figura 6.15. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRIint ×IRIext para SPN nos 72 trechos da RMF 242

Figura 6.16. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRIint × IRIext para SPN em 42 trechos desta pesquisa..... 242

Figura 6.17. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRImédio SLD × IRImédio SLE em 42 trechos desta pesquisa..... 243

Figura 6.18. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRIint SPN × IRIint SLE em 42 trechos desta pesquisa. 244

Figura 6.19. Gráfico, equação e R^2 do modelo ICP P(o) × IRImédioconf SPN nos 72 trechos da RMF..... 251

Figura 6.20. Gráfico, equação e R^2 do modelo ICP P(o) × IRImédioconf SLD em 42 trechos da RMF. 251

Figura 6.21. Gráfico, equação e R^2 do modelo ICP P(o) × IRImédioconf SLE nos 42 trechos da RMF..... 252

Figura 6.22. Gráfico, equação e R^2 do modelo ICP P(o) × média do IRI para as três posições dos sensores com 95% de confiabilidade dos 42 trechos da RMF. 252

Figura 6.23. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRImédioconf × ATR com 95% de confiabilidade para SPN nos 72 trechos da RMF..... 253

Figura 6.24. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRImédioconf × TF nos 72 trechos da RMF considerando os três tipos de revestimento 254

Figura 6.25. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRImédioconf × REM nos 72 trechos da RMF considerando os três tipos de revestimento 255

Figura 6.26. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRImédioconf × REM em 42 trechos da RMF com revestimento em CBUQ 257

Figura 6.27. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRImédioconf × TF nos 20 trechos da RMF com revestimento em TSD 258

Figura 6.28. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRImédioconf × REM nos 20 trechos da RMF com revestimento em TSD 258

Figura 6.29. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRImédioconf × TF nos 10 trechos da RMF com revestimento em AAUQ 259

Figura 6.30. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRImédioconf × DEFnos 72 trechos da RMF 260

Figura 6.31. Gráfico, equação e R^2 do modelo IRImédioconf × NEC nos 72 trechos da RMF 260

Figura 6.32. Evolução do IRI no trecho 085ECE0070D em TSD, pelos modelos $IRI_{D\&S}$ e esta pesquisa 265

Figura 6.33. Evolução do IRI no trecho 025ECE0030D em AAUQ, pelos modelos $IRI_{D\&S}$ e esta pesquisa 265

Figura 6.34. Evolução do IRI no trecho 040ECE0030E em CBUQ, pelos modelos $IRI_{D\&S}$ e esta pesquisa 266

Figura 6.35. Curvas de evolução do IRI no trecho 040ECE0070D para as estratégias propostas na Tabela 6.27 269

Figura 6.36. Curvas de evolução do IRI no trecho 060ECE0030D para as estratégias propostas na Tabela 6.28 270

Figura 6.37. Curvas de evolução do IRI no trecho 085ECE0050E para as estratégias propostas na Tabela 6.29 271

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Custos associados aos serviços de manutenção (DNER, 1998)..... 12

Tabela 2.2. Distribuição de tráfego nas rodovias pavimentadas (DERT-CE, 1998)..... 19

Tabela 2.3. Volume de tráfego nas rodovias estaduais pavimentadas (DERT-CE, 1998)..... 20

Tabela 2.4. Composição da frota de veículos nas rodovias estaduais pavimentadas (DERT-CE, 1998)..... 21

Tabela 2.5. Fatores de equivalência de carga do USACE, (DNER, 1998)..... 21

Tabela 2.6. Fatores de equivalência de carga da AASHTO (DNER, 1998). 21

Tabela 2.7. Esquema para o cálculo do FC..... 22

Tabela 2.8. Classificação da coleta de dados para SGP pelo Índice de Qualidade da Informação IQL (PATERSON & SCULLION, 1990). 24

Tabela 2.9. Valores da Serventia × Conceitos (DNER, 1998). 40

Tabela 2.10. Deterioração em função de três categorias de defeitos (DNER, 1998)..... 48

Tabela 2.11. Causas e tipos de deformações permanentes com o tráfego ou não, (PATERSON, 1987 e DNER, 1998) 49

Tabela 2.12. Fatores de ponderação para defeitos de superfície na norma do IGG (DNIT, 006/2003 – PRO)..... 58

Tabela 2.13. Conceitos de degradação do pavimento em função do IGG (DNIT, 006/2003 – PRO)..... 58

Tabela 2.14. Pontos do pavimento para as medidas das deflexões. 61

Tabela 2.15. Faixas de classificação de irregularidade longitudinal, para diversos países com base no IRI (adaptada de FARIAS e SOUZA, 2002). 90

Tabela 2.16. Condição de rodovias pavimentadas em função do IRI (DNER, 1998)..... 91

Tabela 2.17. Correlação entre IRI e outros índices (WATANATADA et al., 1987)..... 92

Tabela 2.18. Inter-relações dos processos de gestão (adaptada de PATERSON & SCULLION, 1990) 117

Tabela 2.19. Comparação de modelos de Custos de Operação de Veículos (VOC) nos Sistemas HDM III e HDM 4, (adaptada de KERALI et al., 1998b). 119

Tabela 2.20. Comparação de Modelos de Deterioração de Vias no HDM III e HDM 4 (adaptada de KERALI et al., 1998) 120

Tabela 2.21. Ciclo de atividades e função de gerência do HDM 4 (adaptada de KERALI et al., 1998)..... 121

Tabela 2.22. Análise do Ciclo de Vida com a utilização do HDM-4 Manual do HDM v.2 (adaptada de KERALI et al., 1998) 122

Tabela 3.1. Classificação do clima quanto à temperatura média, TM (NIMER, 1979) 132

Tabela 3.2. Classificação do clima quanto a pluviosidade (P) (NIMER, 1979) 132

Tabela 3.3. Predominância de Solos do Estado do Ceará..... 143

Tabela 3.4. Distribuição Pluviométrica do Estado do Ceará (IPLANCE, 1997) 146

Tabela 4.1. Tipos de estrutura padrão e correspondentes misturas asfálticas do SGP-DERT e fluxo de decisão para a solução adotada na faixa de tráfego..... 159

Tabela 4.2. Equações que relacionam a estrutura padrão 1 com os respectivos defeitos e o tráfego..... 159

Tabela 4.3. Defeito, severidade e recomendações no LVC 163

Tabela 5.1. Trechos escolhidos para a pesquisa desta tese e dados de levantamentos anteriores..... 172

Tabela 5.2. Determinação do número N de projeto de trechos da RMF 180

Tabela 5.3. Características físicas de projeto das capas de trechos da RMF 180

Tabela 5.4. Características físicas da camada de ligação dos trechos da RMF..... 180

Tabela 5.5. Características físicas de projeto das bases de trechos da RMF 181

Tabela 5.6. Características físicas de projeto das sub-bases de trechos da RMF..... 181

Tabela 5.7. Características físicas de projeto dos subleitos de trechos da RMF 181

Tabela 5.8. Determinação da % Padrão de Defeitos do trecho 060ECE0050D 185

Tabela 5.9. Determinação da % Padrão de Defeitos do trecho 085ECE0030D 186

Tabela 5.10. Conceitos de tráfego e de defeito pelo LVC 187

Tabela 5.11. Resultados do LVC e conceitos dos trechos escolhidos para esta pesquisa na RMF em 2005 188

Tabela 5.12. Formulário para avaliação do ICP 191

Tabela 5.13. Conceito do ICP em função da escala de valores e estratégia de M&R 192

Tabela 5.14. Vetor estado inicial e valores do ICP inicial P (o) pelo Processo de Markov dos trechos escolhidos nesta pesquisa 193

Tabela 5.15. Exemplo de cálculo da constante K 200

Tabela 5.16. Exemplo de cálculo do IRI de um trecho desta pesquisa 201

Tabela 5.17. Resultado do cálculo do afundamento de um trecho desta pesquisa 202

Tabela 5.18. Coeficientes usados no algoritmo para o cálculo do IRI (SAYERS et al., 1986) 205

Tabela 5.19. Leituras de Irregularidade em bases de calibração no PR, efetuadas em 28/03/2006 com o equipamento a laser da UFC 206

Tabela 5.20. Leituras de Irregularidade em bases de calibração no PR, efetuadas em 14/04/2006 com o equipamento a laser da UFC 206

Tabela 5.21. Leituras de Irregularidade em bases de calibração no PR, efetuadas em 27/04/2006 com o equipamento a laser da UFC 206

Tabela 5.22. Resumo dos resultados obtidos nas bases de calibração do PR com nível e mira e com o *Ciberlaser* da UFC para irregularidade 207

Tabela 5.23. Resultados - trilha interna, trilha externa, média e desvio padrão - do IRI dos 72 trechos da RMF, sensores na posição normal (Julho, 2006) 209

Tabela 5.24. Resultados do ATR dos 72 trechos da RMF, com os sensores na posição normal (Julho, 2006) 211

Tabela 5.25. Resultados do IRI com os três sensores colocados no LD nos 42 trechos da RMF (Julho, 2006) 213

Tabela 5.26. Resultados do ATR com os três sensores colocados no LD nos 42 trechos da RMF (Julho, 2006) 214

Tabela 5.27. Resultados do IRI com os três sensores colocados no LE nos 42 trechos da RMF (Julho, 2006) 215

Tabela 5.28. Resultados do ATR com os três sensores colocados no LE nos 42 trechos da RMF (Julho, 2006) 216

Tabela 5.29. Resultados do IRI nas três posições dos sensores, do IRI médio e do desvio padrão, dos 42 trechos da RMF (Julho, 2006) 217

Tabela 5.30. Resultados do NEC dos 72 trechos da RMF calculados utilizando o *software* HDM 4 (Agosto, 2006) 220

Tabela 6.1. Dados de contagem de tráfego de trechos da CE 040 de 2004 223

Tabela 6.2. Valores da curva de desempenho do ICP dos trechos com revestimento em AAUQ pelo Processo de Markov. 224

Tabela 6.3. Valores da curva de desempenho do ICP dos trechos com revestimento em TSD pelo Processo de Markov. 225

Tabela 6.4. Valores da curva de desempenho do ICP dos trechos com revestimento em CBUQ pelo Processo de Markov 226

Tabela 6.5. Resultados dos defeitos pelo LVC dos 44 trechos selecionados na RMF. ... 232

Tabela 6.6. Resumo dos resultados da equação de evolução para o defeito TF em 44 trechos na RMF. 233

Tabela 6.7. Resultado da análise das equações de evolução de defeitos/severidades em função do F em 44 trechos na RMF. 236

Tabela 6.8. Resultado da análise das equações de evolução de defeitos/severidades em função do F em 32 trechos na RMF com revestimento em CBUQ. 237

Tabela 6.9. Resultado da análise das equações de evolução de defeitos/severidades em função do F em 10 trechos na RMF com revestimento em TSD. 237

Tabela 6.10. Resumo dos resultados do modelo IRIint × IRIext para SPN nos 72 trechos da RMF. 241

Tabela 6.11. Resultado da análise dos modelos de correlação entre os valores do IRI medidos com o perfilômetro a laser em função do F..... 244

Tabela 6.12. Resultados do IRImédio com 95% de confiabilidade com os sensores na posição normal e do ICP(Po) nos 72 trechos da RMF..... 246

Tabela 6.13. Resultados do IRImédio com 95% de confiabilidade com os sensores no LD e do ICP (Po) em 42 trechos desta pesquisa 248

Tabela 6.14. Resultados do IRImédio com 95% de confiabilidade com os sensores no LE e do ICP (Po) em 42 trechos desta pesquisa 249

Tabela 6.15. Resultados da média do IRI para três posições dos sensores com 95% de confiabilidade e do ICP (Po) em 42 trechos desta pesquisa 250

Tabela 6.16. Resultado da análise dos modelos de correlação entre os valores do ICP P(o) e o IRI médio conf. 95% em função do F 251

Tabela 6.17. Resultado da análise dos modelos de correlação entre os valores do IRImédioconf e dos defeitos/severidade em função do F nos 72 trechos da RMF 254

Tabela 6.18. Resultado da análise dos modelos de correlação entre os valores do IRImédioconf e dos defeitos/severidade em função do F em 42 trechos da RMF com revestimento em CBUQ..... 256

Tabela 6.19. Resultado da análise dos modelos de correlação entre os valores do IRImédioconf e dos defeitos/severidade em função do F em 20 trechos da RMF com revestimento em TSD 256

Tabela 6.20. Resultado da análise dos modelos de correlação entre os valores do IRImédioconf e dos defeitos/severidade em função do F em 10 trechos da RMF com revestimento em AAUQ 257

Tabela 6.21. Resultado da análise dos modelos de correlação entre os valores do IRI, com a DEF e o NEC em função do F nos 72 trechos da RMF 259

Tabela 6.22. Valores do IRI médio sensores normais com confiabilidade de 95% calculados em função da equação de correlação y = 12,993 – 0,1191*ICP 261

Tabela 6.23. Valores do IRI médio sensores normais com confiabilidade de 95% calculados em função da equação de DEWAN & SMITH (2002) y = 0,15*(100 - ICP) 263

Tabela 6.24. Conceitos em função dos valores limites do IRI propostos nesta pesquisa . 267

Tabela 6.25. Composição do tráfego médio em três trechos desta pesquisa utilizada para análise no HDM 4 268

Tabela 6.26. Características dos veículos utilizadas na análise dos três trechos desta pesquisa no HDM 4 268

Tabela 6.27. Custos unitários dos veículos utilizados na análise dos três trechos desta pesquisa no HDM 4 em US$ 268

Tabela 6.28. Estratégias de manutenção propostas para o trecho da CE 040 269

Tabela 6.29. Estratégias de manutenção propostas para os trechos da CE 060 270

Tabela 6.30. Estratégias de manutenção propostas para o trecho da CE 085 271

Tabela 6.31. Resumo dos indicadores econômicos 275

Tabela 6.32. Custos do órgão rodoviário e dos usuários para a estratégia Base Alternativa 276

Tabela 6.33. Custos do órgão rodoviário e dos usuários para a estratégia MANUTEN A 277

Tabela 6.34. Custos do órgão rodoviário e dos usuários para a estratégia MANUTEN B 278

Tabela 6.35. Custos do órgão rodoviário e dos usuários para a estratégia MANUTEN C 279

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Preliminares

O Sistema Rodoviário Nacional teve seu ápice de crescimento no período de 1960 a 1980. Atualmente, no Brasil, as rodovias pavimentadas correspondem a aproximadamente 10% de todo sistema de rodovias. Dados do SGP/DNIT, 2003, indicam que o Brasil, possui uma rede de estradas com uma extensão de 1.724.929 km, sendo 172.879,8 km pavimentados, para os seus 8,5 milhões de km^2. Desta extensão pavimentada, 57.211,1 km são de rodovias federais, 94.753,8 km de rodovias estaduais e 20.914,9 km de rodovias municipais. A malha rodoviária federal, estadual e municipal do Estado do Ceará tem 52.159,3 km de extensão, dos quais 8.308,2 km são de rodovias pavimentadas e 43.851,1 km de rodovias não pavimentadas. Considerando-se apenas a malha estadual, de um total de 10.715,6 km, as rodovias pavimentadas atingem pouco mais de 53% (5.755,1 km) e as não pavimentadas implantadas em revestimento primário em torno de 30% (3.119,5 km) enquanto as rodovias em leito natural uma extensão de 1841,0 km, cerca de 17% (DERT, 2004).

Segundo dados históricos aproximados, citados na literatura, há uma necessidade de algo por volta de US$ 1.500/km/ano para a manutenção de uma malha rodoviária pavimentada, o que daria em torno de US$ 8.600.000,00 de investimento anual na malha pavimentada do estado do Ceará, somente para a manutenção rotineira sem considerar qualquer melhoria de vulto do tipo recapeamento, reconstrução ou duplicação, ou ainda pavimentação de novos segmentos.

A evolução da malha viária no Brasil encontra-se penalizada em função da capacidade atual de investimento pelo setor público. Esta é uma das principais razões para a diminuição, em curto prazo, do volume de obras de implantação e/ou pavimentação de novas rodovias. Mas, apesar da escassez de recursos, este valioso patrimônio público deve ser conservado, devendo o planejamento das atividades de conservação rotineira e manutenção periódica ser prioridade deste setor.

Desta forma, faz-se necessário estabelecer mecanismos para garantir a manutenção deste grande patrimônio, avaliado, conforme DNER (1998), em 300 bilhões de dólares. Com este procedimento evita-se a degradação do Sistema Viário com prejuízos imensos à sociedade, tanto pela necessidade de reconstrução precoce em rodovias mal conservadas como pelo aumento do custo operacional dos veículos ou custo dos usuários.

Uma malha viária bem conservada permite o escoamento das safras acelerando o desenvolvimento da região, contribuindo assim para promover a indústria e o comércio, para melhorar a viabilidade das zonas urbanas, com o aumento dos empregos, com a educação e com a geração de novas oportunidades (QUEIROZ et al., 1992).

O estado do pavimento das rodovias tem influência significativa na economia de um país e por conseqüência no custo de vida da sociedade. As condições precárias das estradas aumentam o custo operacional dos veículos, assim como o tempo de viagem, refletindo no aumento do valor do frete que, por sua vez, terá influência no valor final dos produtos transportados e, conseqüentemente, no poder de compra da população em geral.

As demandas competitivas críticas, com recursos cada vez mais limitados, determinam maior atenção dos gestores dos órgãos aos projetos de rodovias mais econômicos e programas de manutenção mais adequados. Os administradores precisam ter respostas para perguntas como: Como decidir as prioridades? Que recursos devem estar disponíveis para a manutenção da malha viária? Quais os benefícios gerados para a sociedade por um valor aplicado em manutenção se comparado a este mesmo valor aplicado em novas rodovias ou em melhoramentos ou em novo investimento em outro setor da economia? (PETERSON, 1987). Seria mais econômica a construção de um pavimento mais resistente para diminuir os custos futuros de manutenção? Seria melhor adotar uma estratégia de construção por etapas, economizando na construção inicial, investindo um pouco mais em manutenção para injetar novos recursos mais tarde em melhoramentos?

A Gestão da Manutenção se destaca hoje no Brasil e há alguns anos em diversos países, como uma tecnologia para onde convergirá, em curto prazo, todas as intenções em busca de modernas técnicas em forma de pesquisa e monitoramento no setor rodoviário.

As execuções de atividades de manutenção e reabilitação são fundamentais em um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGPs). Devem ser estabelecidos critérios para a escolha das estratégias de intervenção e da lista de prioridades.

Os países em desenvolvimento aplicavam, na década de 1990, anualmente, mais de 10 bilhões de dólares no setor rodoviário, em compensação, o custo que onera os usuários devido à operação dos veículos é 8 a 10 vezes maior (DOMINGUES, 1993). Nos Estados Unidos e na Europa, onde os recursos são bem maiores, há uma busca intensa da economia de altos valores ligados ao tempo de viagem dos motoristas, devido ao grande volume de tráfego nas rodovias. Nos países em desenvolvimento, apesar da maioria das rodovias apresentar níveis de tráfego baixo, os valores economizados, ligados ao tempo de viagem são muito menores.

Devido à crescente necessidade de reabilitar pavimentos em função da limitada disponibilidade orçamentária, muitos órgãos estão utilizando os SGPs de qualquer forma para preservar os vultosos investimentos em pavimentos e maximizar os limitados recursos. Entretanto, apesar de duas décadas de uso, os SGPs mesmo implantados de forma contínua e prática, ainda não são amplamente utilizados pelos engenheiros rodoviários e pelo pessoal técnico - administrativo (KULKARNI e MILLER, 2003).

A gerência de pavimentos é uma ferramenta importante para novas construções, pois com um acompanhamento sistemático é possível manter estes pavimentos em estado de ótima conservação, resultando, assim, maior durabilidade. O importante é que se tenha o acompanhamento de todas as atividades, planejando as alternativas de intervenções, acompanhando as decisões tomadas e formando um banco de dados que permita a obtenção de informações para essa tomada de decisão.

Desta forma o sistema permitirá que as decisões e a implementação das mesmas sejam aplicadas de forma eficiente nos locais de maiores necessidades, evitando assim, a aplicação desnecessária ou prematura dos recursos disponíveis. É essencial que a implantação do Sistema de Gerência de Pavimentos seja compreensível para as pessoas envolvidas e apropriadas à gestão que o utilizará. Isso será mais fácil com a elaboração de um banco de dados que seja simples e facilmente aplicável ao sistema.

No Brasil, o primeiro SGP foi implantado pelo DNER, hoje DNIT, no início dos anos 1980 para a sua malha rodoviária federal. A Divisão de Planos e Programas, na época, coordenou o Grupo de Aplicação do Modelo HDM (GHDM), com o objetivo de desenvolver e implantar um Sistema de Gerência de Pavimentos. Os estudos iniciais tinham como meta efetuar uma análise plurianual de investimentos e estabelecer prioridades e calcular custos. O DNER procurou, nos anos seguintes, atualizar e aprimorar o seu SGP, devido às modificações que se fizeram necessárias. Vários estados seguiram o exemplo do então DNER e implementaram seus SGPs, dentre eles, Minas Gerais, Santa Catarina, Paraná e Ceará.

No Estado do Ceará, o Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes (DERT), órgão responsável pela gestão da malha rodoviária estadual, vem realizando estudos, levantamentos e implantando metodologias e sistemas. Em 1993, foram realizados os primeiros estudos para a implantação de um SGP, para a sua malha viária. Esses estudos foram financiados pelo BID (Banco Interamericano de Desenvolvimento) que propôs a utilização do *software* HDM-III. Esse *software* subsidia um SGP, auxiliando a análise da viabilidade técnico-econômica de projetos. Assim, dois relatórios foram gerados em 1994 e 1998, os quais apresentaram, por exemplo, os defeitos (trincas, panelas etc.) das rodovias pavimentadas no Estado do Ceará (BENEVIDES et al., 2004).

Como o HDM III era utilizado para avaliação de deterioração e não na própria gerência, a partir do ano 2000 o DERT procurou aperfeiçoar o seu sistema de gerência aliado a um planejamento de conservação rotineira. Para isso, foi contratada uma empresa de consultoria que elaborou um sistema denominado Sistema Integrado de Gestão de Manutenção (SIGMA). Esse sistema auxilia nas decisões das intervenções de manutenção e de conservação (rotineiras e periódicas), além de permitir realizar uma interface com o próprio HDM 4, podendo, ainda, alterar os parâmetros assumidos por este *software*.

A irregularidade longitudinal, conforme citado na literatura por diversos autores, tais como HAAS et al. (1994) e SAYERS & KARAMIHAS (1996) é o parâmetro mais utilizado internacionalmente, para a avaliação funcional de pavimentos. Elas são decorrentes de problemas de construção ou de defeitos oriundos da ação do tráfego e do clima, principalmente das deformações permanentes do revestimento e do subleito. Uma forma de medição das irregularidades é a que utiliza equipamentos especiais e define

um padrão de medidas chamado IRI (*International Roughness Index*), definido como sendo um parâmetro que representa "*os desvios da superfície de um pavimento em relação a uma superfície plana, com características e dimensões que afetam a dinâmica dos veículos, a qualidade do rolamento, o carregamento dinâmico e a drenagem*" (ASTM E-867-82A, 1982).

Os órgãos rodoviários podem estabelecer um planejamento mais eficiente que permite que sejam tomadas medidas de decisões no tempo certo e assim obter significativos ganhos orçamentários, ao reduzir o erro na previsão de deterioração dos pavimentos. Além de se constituírem em ferramentas de fundamental importância para o gerenciamento das redes de rodovias, os modelos de previsão de deterioração dos pavimentos são também utilizados para a estabelecer critérios em cobranças de tarifas nas rodovias concessionadas (PROZZI e MADANAT, 2003).

1.2. Objetivos da Pesquisa

Esta pesquisa tem como principais objetivos o desenvolvimento dos modelos de previsão de desempenho de pavimentos para um Sistema de Gestão, a seguir elencados:

a) Modelos probabilísticos de previsão de desempenho utilizando as matrizes de probabilidade de transição de Markov, tendo como base os dados de levantamentos efetuados por técnicos especialistas e/ou dados históricos.
b) Determinar as equações de evolução para os defeitos/severidade usando os dados obtidos nos Levantamentos Visuais Contínuos – LVC – em 2004 e 2005.
c) Modelos de previsão de desempenho com estabelecimento de equação de regressão em função do parâmetro irregularidade longitudinal, que correlacionem os valores do IRI obtidos com o perfilômetro inercial a laser em 2006.
d) Estabelecer modelos que correlacionem os valores do IRI, obtidos com o aparelho a laser, com os defeitos indicados pelo LVC, com os valores do ICP dos modelos probabilísticos, com a deflexão e com o número estrutural corrigido.
e) Utilizar o *software* HDM 4 para analisar, a partir de estratégias de manutenção propostas, a evolução da irregularidade longitudinal em alguns trechos

escolhidos, assim como para proceder a uma avaliação econômica das possíveis intervenções de restauração em um desses trechos.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Identificar os dados e informações disponíveis no sistema de gestão de pavimentos existente no DERT, o SIGMA (DERT, 2003);
- Produzir um conjunto sistematizado de procedimentos que possibilite a avaliação dos desempenhos dos pavimentos pelos diferentes modelos;
- Servir de apoio e embasamento, através da estimativa de valores referenciais de desempenho dos pavimentos, às decisões de políticas de manutenção rodoviária de um Sistema de Gestão em geral e em particular para o SIGMA.

1.3. Metodologia

No desenvolvimento de modelos de desempenho de pavimentos asfálticos é de suma importância a forma de obtenção dos dados de levantamentos. Os modelos de desempenho exprimem os comportamentos dos pavimentos em função das variáveis: dependentes e independentes (explicativas). A metodologia utilizada para atingir os objetivos expostos anteriormente é a seguir descrita:

a) Levantamento do inventário de informações junto ao DERT-CE dos estudos realizados, coletando os dados disponíveis notadamente de irregularidade longitudinal, de levantamentos visuais contínuos e de deflexão e selecionar os trechos que serão estudados;
b) Coletar informações de levantamentos dos trechos selecionados, provenientes de dados históricos ou das opiniões de técnicos especialistas, para determinar o Índice de Condição do Pavimento (ICP);
c) Com os dados anteriores, gerar modelos de desempenho probabilísticos, utilizando o processo de transição de Markov, que permite estimar as condições futuras dos pavimentos tendo como base as condições atuais;
d) Efetuar levantamentos visuais contínuos, LVC, dos defeitos/severidades de trechos selecionados da malha viária estadual, em 2005;
e) Analisar os resultados dos levantamentos visuais contínuos de 2004 e 2005 e utilizando um programa de estatística, gerar equações de evolução dos defeitos;

f) Efetuar levantamentos de irregularidades longitudinais, IRI, de trechos selecionados da malha viária estadual, utilizando equipamento a laser, em 2006;

g) Analisar os resultados dos levantamentos de IRI e utilizando programas de estatística gerar modelos de correlação entre os valores do IRI;

h) Desenvolver modelos de desempenho de pavimentos correlacionando o IRI com o ICP, com os defeitos, com a deflexão e com o número estrutural corrigido;

i) Efetuar a avaliação técnica da previsão de evolução do IRI em função das estratégias de manutenção adotadas para um determinado projeto ou trecho utilizando o *software* HDM 4, e mostrar a utilização desta importante ferramenta na análise econômica destas estratégias.

1.4 Desenvolvimento do trabalho

Neste trabalho foram desenvolvidos sete (7) capítulos e três (3) anexos, assim distribuídos:

O Capítulo 2 é uma revisão bibliográfica que resume, com base na literatura nacional e internacional, os desenvolvimentos dos Sistemas de Gerência de Pavimentos, objetivando caracterizar os conceitos fundamentais e divisões. O parâmetro Irregularidade Longitudinal e os modelos de desempenho de pavimentos, são especialmente enfocados por se constituírem nos objetivos principais desta pesquisa.

No Capítulo 3 são mostrados os aspectos gerais e naturais do estado do Ceará.

O Capítulo 4 trata da apresentação do Sistema de Gestão e dos dados disponíveis da malha viária do DERT-CE, além de alguns levantamentos efetuados. O equipamento a laser usado nos levantamentos do IRI é também apresentado, sendo descritos os procedimentos de utilização deste aparelho.

No Capítulo 5 são apresentados e analisados os procedimentos e os resultados dos levantamentos efetuados pelo LVC em 2005 e do de IRI em 2006, da deflexão em 2001, além dos dados de levantamentos de trechos, provenientes das opiniões de técnicos especialistas.

No Capítulo 6 são desenvolvidos os modelos probabilísticos e estatísticos de previsão de desempenho de pavimentos, além da utilização do *software* HDM 4 para estudos de

previsão de evolução da irregularidade longitudinal em alguns trechos e a análise econômica em um desses trechos.

O capítulo 7 apresenta as conclusões, observações gerais e recomendações para futuras pesquisas.

No Anexo I são detalhados os procedimentos com os *software* Ciberlogger e Cibershell.

No Anexo II apresenta-se como exemplo uma planilha de cálculo do IRI de um trecho com 50,0 m para um algoritmo com espaçamento (dx) = 0,5 m.

No Anexo III são apresentadas as tabelas com os resumos dos resultados das análises de regressão dos modelos estatísticos desta pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Visão Geral de um Sistema de Gerência de Pavimentos

2.1.1 Conceitos, Objetivos, Divisão e Implementação.

Os Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGPs) vêm sendo desenvolvidos desde a década de 1960 tendo como fundamentos os conceitos de serventia, de desempenho, da modelagem de irregularidade longitudinal, do conceito de carga por eixo equivalente e da análise de materiais e estruturas, estabelecidos pela AASHO *Road Test* (HRB, 1962) e os estudos no Canadá (CGRA, 1965). Na literatura são encontradas várias definições de um SGP, porém todas têm em comum os princípios básicos. Dentre elas, podem ser destacadas:

- Um Sistema de Gerência de Pavimentos é um conjunto de ferramentas que serve para auxiliar os tomadores de decisão na busca de estratégias viáveis, para avaliar, prover e manter os pavimentos em boas condições durante um determinado período de tempo (AASHTO, 1990).
- Um Sistema de Gerência de Pavimentos consiste de um elenco de atividades coordenadas, relacionadas com o planejamento, projeto, construção, manutenção, avaliação e pesquisa de pavimentos (HAAS et al., 1994).

KULKARNI e MILLER (2003) destacam o progresso conseguido nas três últimas décadas em oito elementos principais dos SGPs, assim como dos significantes projetos de melhoramentos que são esperados para os próximos dez anos. Os autores avaliam o passado, o presente e o futuro destes oito elementos-chave. O passado cobre o período entre os anos 1970 e os anos 1980, o presente corresponde aos anos 1990 e o futuro a primeira década do século vinte e um. Também é destacado que os SGPs desde a sua introdução no final dos anos 1960 e início dos anos 1970, têm evoluído em termos de escopo, aplicação e metodologia. Os SGPs foram concebidos para mudar a tendência dominante de modelos de projeto e construção para os modelos de reparos e manutenção. Os oito elementos-chave que foram abordados são a seguir elencados:

a. Funções;

b. Coleta e gerenciamento de dados;

c. Previsão de desempenho dos pavimentos;

d. Análises econômicas;

e. Avaliação das prioridades;

f. Otimização;

g. Medidas institucionais;

h. Informações tecnológicas.

Na Figura 2.1 é apresentada a evolução da abrangência das funções de um Sistema de Gerência de Pavimentos, enquanto que na Figura 2.2 são apresentadas as tendências de previsão de desempenho de pavimentos, ambas adaptadas de KULKARNI e MILLER (2003).

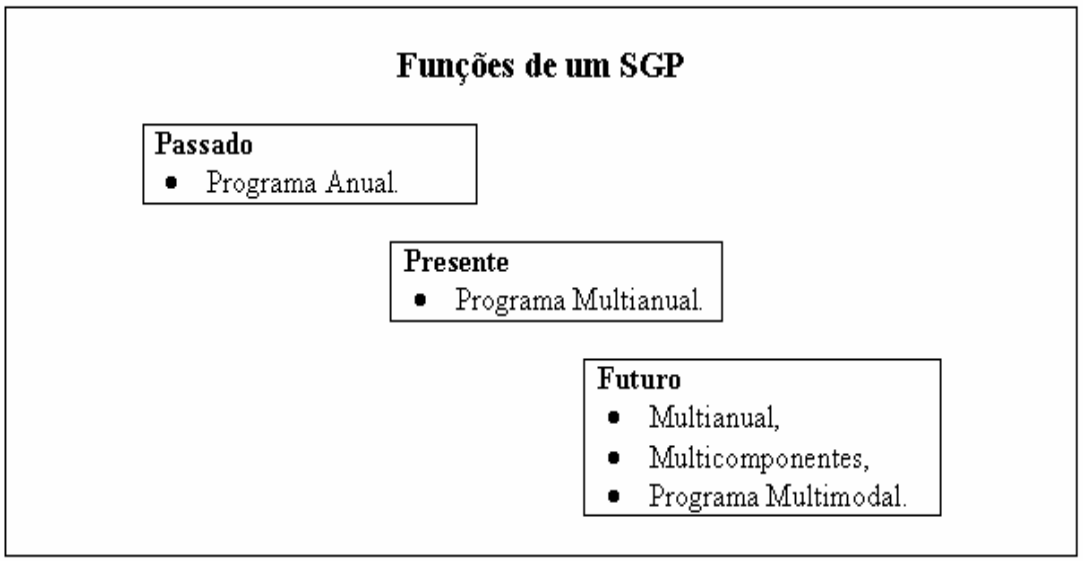


Figura 2.1 Evolução da abrangência das funções de um Sistema de Gerência de Pavimentos (adaptada de KULKARNI & MILLER, 2003)

O objetivo principal do SGP é a utilização de informações confiáveis e critérios de decisão que possibilitem o estabelecimento de um programa de construção, manutenção e reabilitação de pavimentos, dando o máximo retorno possível para os recursos disponíveis. Para que este objetivo seja alcançado, o SGP deve ser capaz de comparar, priorizar e alocar os recursos do seu programa de manutenção e reabilitação (M&R).

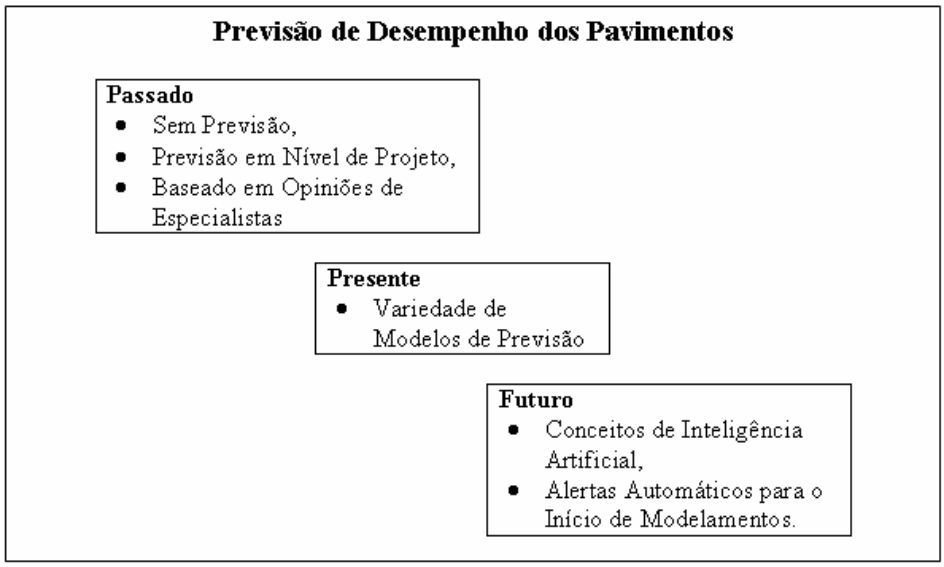


Figura 2.2 Tendências de previsão de desempenho de pavimentos (adaptada de KULKARNI &MILLER, 2003)

A manutenção é definida como a preservação da condição do pavimento, da segurança e da qualidade de rolamento, enquanto que a reabilitação é um melhoramento estrutural ou funcional que produz uma extensão significativa na vida útil, melhorando substancialmente a condição do pavimento e a qualidade de rolamento. A manutenção e a reabilitação têm dois objetivos diferentes. Descrevê-los como grupos de técnicas distintas, obscurece a distinção entre eles, porque muitas técnicas são usadas tanto para manutenção quanto para reabilitação. Milhões de dólares são gastos em manutenção e reabilitação de pavimentos todos os anos nos Estados Unidos. Porém, ainda não podem ser quantificados os efeitos iniciais e em longo prazo de diferentes tratamentos de manutenção e de reabilitação em desempenho de pavimentos, conforme citado na pesquisa - LTPP - *Long-Term Pavement Performance* (NCHRP, 2002).

As atividades de manutenção geralmente são divididas em três categorias: (1) preventiva, (2) corretiva e (3) de rotina. A manutenção preventiva inclui aquelas atividades no pavimento que protege a sua estrutura, impede a deterioração e permite uma boa condição de rolamento sem que haja acréscimo na sua capacidade estrutural e conseqüentemente mantêm a serventia. A manutenção corretiva inclui aquelas atividades que têm como objetivo sanar ou reparar os defeitos localizados. A manutenção de rotina é definida pela AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials* - como as atividades de manutenção do dia a dia que são inventariadas ou fixadas e que estão sob controle do pessoal da manutenção

(BAUSANO et al., 2004).

O enfoque dos órgãos rodoviários, atualmente, tem mudado de projeto e construção de novas rodovias para manutenção preventiva e reabilitação dos pavimentos existentes. As atividades de manutenção geralmente utilizadas são preventivas e corretivas. A primeira é aplicada no estágio inicial e a última na fase mais extensiva de deterioração do pavimento. A manutenção preventiva tem o custo efetivo maior do que a rotineira (KHATTAK e ALRASHIDI, 2004). Sempre que possível, é recomendável a execução das atividades de manutenção preventiva e/ou rotineira, por resultarem em um baixo custo e, se executadas de forma correta e periódica, irão adiar por longos períodos as atividades de manutenção programadas, que resultam em um custo muito superior. A Tabela 2.1 mostra os custos associados aos serviços de manutenção (DNER, 1998).

Tabela 2.1 Custos associados aos serviços de manutenção (DNER, 1998)

Tipo de Intervenção	Faixa de Variação de Custos (por km de Rodovia)
Manutenção de Rotina	US$ 300 a US$ 5.000
Manutenção Periódica	US$ 8.000 a US$ 40.000
Reabilitação	US$ 30.000 a US$ 200.000
Reconstrução	US$ 45.000 a US$ 300.000

Os seguintes assuntos relacionados aos efeitos da manutenção e reabilitação foram estudados dentro do LTPP (NCHRP, 2002):

- A efetividade relativa de diferentes tratamentos de manutenção e reabilitação na produção de melhorias imediatas na condição do pavimento;
- A efetividade relativa de diferentes tratamentos de manutenção e reabilitação na produção de mudanças a longo prazo na condição do pavimento, e
- A influência do clima, do nível de tráfego, da capacidade estrutural e da condição pré-tratamento na efetividade de diferentes tratamentos de manutenção e de reabilitação.

A ausência de uma política consistente para a gerência de um sistema viário, do qual os pavimentos representam parcela significativa, tem contribuído para que haja desperdícios de recursos financeiros, de mão-de-obra qualificada e de equipamentos. Deve-se também salientar que as atividades de M&R, vinham sendo realizadas, na

maioria das vezes, fora das recomendações técnicas, ocasionando grandes prejuízos financeiros para o poder público e para os usuários (PATERSON, 1987).

De modo geral, cada órgão rodoviário já utiliza alguma forma de SGP. Por não haver uma padronização na organização de um sistema de gerência, um órgão ao implantá-lo, faz uma adaptação que atenda a vários fatores, dentre os quais, as necessidades, as características da malha viária e os recursos disponíveis (MARCON, 1996; YSHIBA, 2003).

Um SGP deve fornecer o maior número possível de informações necessárias, permitindo assim que os tomadores de decisão possam escolher as melhores estratégias de M&R e posteriormente analisar e avaliar os resultados. Por outro lado, será útil lembrar que um sistema de gerência tem, por finalidade fundamental, a missão de facilitar e embasar as tomadas de decisões. As relações entre parâmetros não devem, necessariamente, resultar de uma análise matemática complexa. O essencial é que elas sejam admitidas e entendidas pela maioria dos usuários do sistema e consideradas como representativas da situação real. O SGP tem como principais metas, proporcionar um atendimento aceitável ao público de modo geral e ser apropriado à estrutura do órgão (PATERSON, 1987).

Um Sistema de Gerência assumirá sempre uma configuração e um desenvolvimento inerentes ao contexto em que se insere, seja ele rodoviário ou supra-rodoviário. Assim, de forma a atestar a presente assertiva, tendo-se, portanto, em atenção os conceitos, as características e o estado atual dos conhecimentos relativos a esta questão, deverão ser analisados também os pontos-chave a considerar no desenvolvimento e na implantação de um sistema de Gerência Rodoviária. De antemão, pode-se afirmar que um banco de dados confiável é, para qualquer sistema, o ponto principal a considerar e a desenvolver. A sua eficácia condiciona todo o sistema.

Uma citação da AASHTO (1990) é que "*Um SGP é projetado como uma ferramenta de planejamento estratégico para a administração superior e como uma ferramenta de engenharia para os tomadores de decisões técnicas*".

Um SGP deverá ser, por fundamentação, necessariamente receptivo, por não existir um ponto de partida definido para a sua concepção e aplicação. O problema pode ser

abordado, através de um ou de vários subconjuntos, sem, contudo, perder de vista a coerência global do sistema pretendido, ao longo dos estudos e das aplicações parciais. Como exemplo, cita-se a aplicação de um SGP que pode começar pela avaliação e acompanhamento do estado dos pavimentos, evoluindo progressivamente através dos procedimentos de intervenção, de otimização sob condição de restrições orçamentárias, etc.

MARCON (1996) destaca que os principais objetivos de um SGP podem ser reunidos em três grupos:

- Usar um conjunto de informações confiáveis, auxiliar a administração superior.
- Propiciar conforto e segurança ao usuário, reduzindo os custos de operações dos veículos.
- Possibilitar por meio de métodos sistemáticos, embasados em critérios técnicos, administrativos e econômicos, as tomadas decisões de seleção e priorização das intervenções em uma rede de pavimento.

SILVA (2002) cita que "*um sistema de gerência de pavimentos constitui-se de um conjunto de procedimentos que redunda na otimização de decisões gerenciais a partir de bases racionais, considerando a dinâmica dos processos"*.

O processo de tomada de decisão em um SGP tem sido dividido em dois níveis (HAAS et al., 1994): de rede e de projeto. As atividades de planejamento, de programação e de orçamento estão incluídas nas decisões em nível de rede, enquanto que em nível de projeto, estão as atividades de dimensionamento, de construção e de manutenção.

Os dois níveis têm como referência o banco de dados que deve ser atualizado por meio de retroalimentação, que é um procedimento que atualiza periodicamente os dados e as informações de uma rede. Esta atualização é realizada com o uso de pesquisas e estudos especiais. Na Figura 2.4 (modificada de HAAS et al., 1994) é apresentado um Fluxograma de um Sistema de Gerência de Pavimentos.

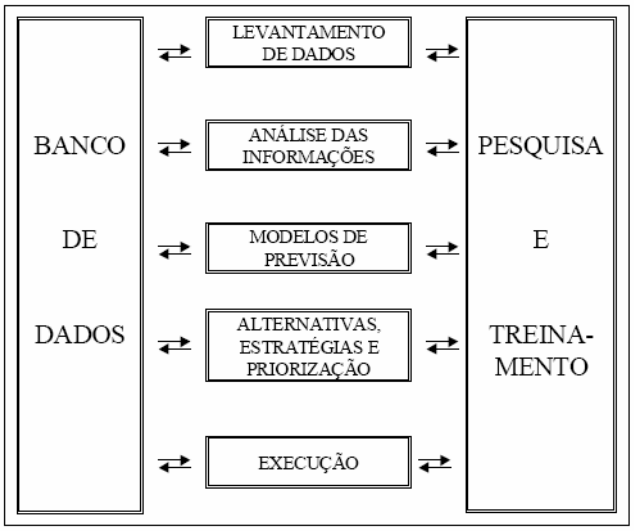


Figura 2.3 Principais atividades de um SGP (SILVA, 2002)

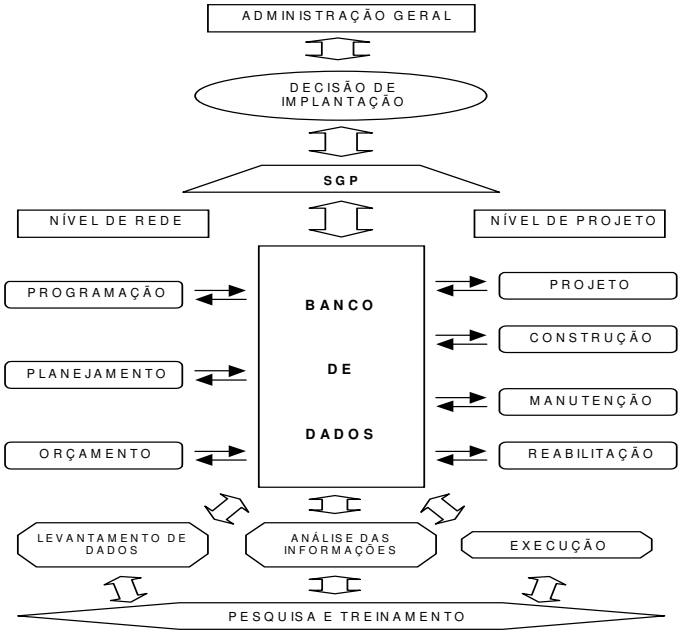


Figura 2.4 Fluxograma de um sistema de gerência de pavimentos (modificada de HAAS et al., 1994)

2.1.2 Sistema de Gerência de Pavimento em nível de rede

O SGP em nível de rede caracteriza-se por estudar uma grande área ou malha viária, onde se situam muitas rodovias pavimentadas, impedindo a existência de estudos muito detalhados, sob pena de elevação inconcebível dos custos. Portanto, predomina a

quantidade sobre a qualidade, em se tratando de atividades de coleta e de análise de dados.

As atividades de coleta de dados são de grande importância em um SGP, por serem fontes de embasamentos nas análises e decisões que se fizerem necessárias. As informações devem ser colhidas com objetividade, atualidade e confiabilidade (AASHTO, 1990).

Um elemento essencial em qualquer SGP é a disponibilidade de dados precisos e confiáveis. Para muitos administradores, nos custos totais de um SGP, a coleta de dados é o componente de maior custo unitário. Por causa disso, detecta-se uma tendência cada vez mais forte de se usar equipamentos automáticos para a coleta de dados, que permitem que significativos volumes de dados sejam coletados e processados rapidamente, utilizando altas velocidades e com pequenas interrupções do tráfego. Os itens mais comuns que são coletados desta forma nos pavimentos asfálticos, são: irregularidade, afundamento de trilha de roda e rugosidade (BENNETT, 1998).

Coleta de dados

Devem ser colhidos dados de: inventário, condições de pavimento, custos e tráfego.

a) Inventário

No inventário é efetuada uma coleta dos registros históricos disponíveis do órgão, com as informações características principais de cada trecho, tais como: tipo de pavimento, materiais e espessuras das camadas, ano de construção e demais informações relevantes.

b) Condições de pavimento

Nas condições do pavimento, as informações coletadas, tais como: irregularidade, capacidade estrutural, desgaste e segurança, devem permitir que o estado estrutural e funcional de cada trecho seja avaliado.

c) Custos

A determinação dos custos envolve muitas variáveis, principalmente no que se refere à operação de veículos e tempo de viagem, ou seja, os que estão diretamente relacionados

com os usuários. Devem ser colhidas informações sobre os custos de construção e das manutenções efetuadas nos trechos ou em toda rede.

d) Tráfego

No tráfego, as informações coletadas de forma aleatória, defasadas e sem indicação de metodologia de trabalho, são deficiências que repercutem de forma substancial na definição do desempenho do pavimento. O estabelecimento de critérios de contagem e de pesagem de veículos é fundamental na formação de um banco de dados confiável, para que se possa prever a demanda e o crescimento do tráfego. Estes condicionantes permitem que se definam faixas para a determinação do Fator de Veículo (FV) e do volume médio diário de veículos comerciais no sentido mais solicitado (VMDc), para a obtenção do número N de repetições de cargas equivalentes ao eixo padrão de 8,2 tf (BENEVIDES, 2000).

O número N de operações do eixo padrão é calculado pela expressão 2.1:

$$N = Vt \times FV \times FR \qquad (2.1)$$

onde:

Vt – volume total de veículos no período de projeto;

FV – fator de veículos;

O Vt é obtido através da expressão 2.2, onde P é o período de projeto em anos:

$$Vt = 365 \times VMDc \times P \qquad (2.2)$$

O VMDc é calculado em função do volume médio diário de veículos que passa na faixa da via mais solicitada. O seu valor é determinado para o ano de abertura (V_1) e projetada uma taxa de crescimento (t%) para todo o período de projeto, admitindo-se, conforme SOUZA (1966, 1981), taxas de crescimento anual em progressão geométrica (não linear) ou aritmética (linear), para o cálculo do Vt. As componentes importantes na obtenção destes parâmetros são:

- Volume inicial obtido com as últimas estatísticas de tráfego existente;

- Tráfego desviado, correspondente ao montante de veículos que passará a utilizar o trecho projetado após sua abertura e que atualmente utilizam rotas alternativas;
- Tráfego gerado, ou seja, as novas viagens que resultarão das variações no tipo e intensidade de serviços nas áreas de influência do trecho de projeto;
- Dados econômicos da região.

Para o período de projeto, tem sido adotado para pavimentos asfálticos em média dez anos, não sendo aconselháveis períodos maiores, devido à dificuldade de avaliação prospectiva da configuração das cargas e dos eixos dos veículos e do próprio volume de tráfego.

A determinação do fator de veículos é feita por amostragem no tráfego, estabelecendo-se a classificação pelo número de eixos, assim agrupada (DNER, 1998):

- Automóveis e utilitários;
- Ônibus;
- Caminhões leves, com dois eixos simples, de rodas simples;
- Caminhões médios, com dois eixos, sendo o traseiro de rodas duplas;
- Caminhões pesados, com dois eixos, sendo o traseiro "tandem";
- Reboques e semi-reboques: as diferentes condições de veículos, em unidades múltiplas.

Acrescenta-se a esta classificação outras configurações diferentes, tipos veículos combinados, chamados bitrens ou rodotrens.

O fator de veículo é um número que multiplicado pela quantidade de veículos em operação, resulta no número de eixos equivalentes ao eixo padrão, ou seja, transforma em poder destrutivo de eixo equivalente de 8,2 tf de um eixo padrão, os eixos dos vários tipos de veículos que compõem o tráfego. Não são considerados os fatores de veículos dos automóveis e caminhões leves. O FV é obtido em função do fator de carga (FC) e do fator de eixos (FE), pela expressão:

$$FV = FC \times FE \tag{2.3}$$

Para o cálculo destes fatores são necessárias que sejam colhidas informações que envolvam volume e composição de tráfego, para a implantação de um plano de contagem. Este procedimento possibilita a obtenção de dados básicos para os programas de planejamento, elaboração de planos diretores, estudos de viabilidade técnica e econômica e também de subsídios para o tratamento estatístico de acidentes, policiamento e pesagem.

O Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes do Estado do Ceará - DERT - em 1997/1998 implantou um sistema de contagem de tráfego. Os resultados são apresentados nas Tabelas 2.2, 2.3 e 2.4. A Tabela 2.2 mostra a distribuição do tráfego nas rodovias pavimentadas sob a jurisdição do DERT-CE. Os resultados foram obtidos através de pesquisa realizada em 206 postos de contagem de tráfego. Ela indica a extensão e a porcentagem por faixa de VMD em relação a um total de 3442 km.

Tabela 2.2 Distribuição de tráfego nas rodovias pavimentadas (DERT-CE 1998)

Volume de tráfego (VMD)	**Extensão (km)**	**Percentagem (%)**
VMD < 200	937	27
200 ≤ VMD < 500	1385	41
500 ≤ VMD < 1000	769	22
1000 ≤ VMD < 2000	254	7
VMD ≥ 2000	97	3
Total	3442	100

A Tabela 2.3 indica o volume de tráfego em 1997 e 1998, nas mesmas rodovias, obtidos através de pesquisas realizadas em 12 postos permanentes de contagem de tráfego e na Tabela 2.4, é apresentada a composição da frota de veículos nas rodovias estaduais, determinada em função da média de contagem dos mesmos 12 postos em 2003. No capítulo 6 é mostrado um cálculo da composição da frota de veículos para trechos da CE-040.

A determinação do fator de carga é baseada no conceito de equivalência de operações, que é um número que relaciona o efeito de uma passagem de qualquer tipo de veículo sobre o pavimento com o efeito provocado pela passagem de um eixo considerado padrão. A grande variedade de configurações de caminhões e cargas por eixos e a ação destas cargas no pavimento são dificuldades a serem superadas ao se projetar tráfego

futuro para a definição das espessuras das camadas. Os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos as modelam, transformando as cargas atuantes em números de passagem do eixo padrão.

No Brasil são utilizados dois fatores de equivalência de carga. O método de projetos de pavimentos flexíveis do DNER (1966, 1981) e o projeto de reforço TECNAPAV (PRO 269/94) adotam os fatores desenvolvidos pelo USACE (Corpo de Engenheiros do Exército Americano). O método de projeto de reforço DNER PRO 159/85, considera os fatores de equivalência da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) somente para eixos simples de roda dupla e para eixo duplo e os fatores de equivalência do GEIPOT para todos os outros eixos. Em todos os casos considera-se o eixo padrão de roda dupla de 8,2 tf.

Os fatores de equivalência do USACE avaliam os efeitos do carregamento na deformação permanente (afundamento da trilha de roda), enquanto que os da AASHTO baseiam-se na perda de serventia (PSI), índice de serventia terminal, resistência do pavimento expressa pelo Número Estrutural e variam com o tipo de pavimento (asfáltico ou rígido) (DNER, 1998). As Tabelas 2.5 e 2.6 apresentam as expressões para o cálculo dos fatores de equivalência de carga do USACE e AASHTO, respectivamente.

Tabela 2.3 Volume de tráfego nas rodovias estaduais pavimentadas (DERT-CE, 1998)

Código dos postos	Localização		Volume de tráfego (VMD total)	
	Rodovia	km	Ano 1997	Ano 1998
01	CE-040	28	4.209	4.611
02	CE-187	45	1.878	2.105
03	CE-060	200	1.190	1.220
04	CE-060	416	436	501
05	CE-065	13	5.315	5.615
06	CE-371	91	4.05	423
07	CE-363	62	213	215
08	CE-364	41	192	214
09	CE-176	226	333	343
10	CE-293	22	1.990	1.900
11	CE-354	102	1.520	1.505
12	CE-292	127	243	426

Tabela 2.4 Média da composição da frota de veículos nas rodovias estaduais pavimentadas (DERT-CE, 2003)

Veículos	% em relação a frota
Carro de passeio	63
Ônibus	9
Caminhão leve	16
Caminhão médio	9
Caminhão pesado	3

Tabela 2.5 Fatores de equivalência de carga do USACE, DNER (1998)

Tipo de eixo	Faixas de cargas (tf)	Equações (P em tf)
Dianteiro simples Traseiro simples	0 - 8	$FC = 2{,}0782 \times 10^{-4} \times P^{4{,}0175}$
	≥ 8	$FC = 1{,}8320 \times 10^{-6} \times P^{6{,}2542}$
Tandem duplo	0 - 11	$FC = 1{,}5920 \times 10^{-4} \times P^{3{,}472}$
	≥ 11	$FC = 1{,}5280 \times 10^{-6} \times P^{5{,}484}$
Tandem triplo	0 - 18	$FC = 8{,}0359 \times 10^{-5} \times P^{3{,}3549}$
	≥ 18	$FC = 1{,}3229 \times 10^{-7} \times P^{5{,}5789}$

Tabela 2.6 Fatores de equivalência de carga da AASHTO (DNER 1998)

Tipos de eixo	Equações (P em tf)
Simples de rodagemsimples	$FC = (P/7{,}77)^{4{,}32}$
Simples de rodagemdupla	$FC = (P/8{,}17)^{4{,}32}$
Tandem duplo	$FC = (P/15{,}08)^{4{,}14}$
Tandem triplo	$FC = (P/22{,}95)^{4{,}22}$

O Código Nacional de Trânsito regulamenta as dimensões máximas dos veículos, artigo 81; as características principais, artigo 82, Decreto-Lei nº 88.686 de 06/09/83 e Resolução do DNER n° 769/80; além dos artigos 83, parágrafo único e 84 que disciplinam os limites máximos de peso bruto por eixo e por conjunto de eixos. No que pese a existência dessa regulamentação as transgressões são freqüentes, acarretando em desgaste acelerado dos pavimentos e sobrecargas nas obras-de-arte especiais (pontes e viadutos).

A Tabela 2.7 mostra resumidamente a seqüência de cálculo do FC, obtidos após os dados de pesagem com os eixos agrupados por intervalos de carga.

Nas Tabelas 2.5 ou 2.6, obtêm-se os valores da coluna 3, da Tabela 2.7 através das expressões.

Os produtos dos valores da coluna 2 que são obtidos das contagens particulares de cada segmento pelos valores da coluna 3, resultam nos valores da coluna 4.

O Somatório ($\sum$) dos fatores de operação é igual a cem vezes o FC e é chamado de equivalência de operações.

$$FC = \frac{\text{Equivalência}}{100} \qquad \textbf{(2.4)}$$

Tabela 2.7 Esquema para o cálculo do FC

(1)	(2)	(3)	(4)
Eixos simples (t)	% na composição do tráfego	Fator de equivalência	Fator de operações
Eixos tandem (t)			
			$\sum$ = 100 FC

Fator de eixo (FE)

O fator de eixo é um valor que transforma o tráfego previsto com sua distribuição de configurações em um número de eixos médios por veículo, em função da composição do tráfego na faixa mais solicitada, em números de passagens de eixos equivalentes. Para a determinação do FE, calcula-se o número de eixos dos tipos de veículos atuantes na rodovia, através da expressão:

$$FE = \left(\frac{P_2}{100}\right) \times 2 + \left(\frac{P_3}{100}\right) \times 3 + \ldots\ldots\ldots + \left(\frac{P_n}{100}\right) \times n \qquad (2.5)$$

onde:

P_2 = porcentagem de veículos de 2 eixos;

P_3 = porcentagem de veículos de 3 eixos;

P_n = porcentagem de veículos de n eixos;

$P_2 + P_3 + \ldots\ldots\ldots + P_n = 100\%$.

Num programa de análise mecanística, por exemplo, (MOTTA, 1991; BENEVIDES, 2000), as variáveis de tráfego utilizadas, são as de carregamento do eixo padrão. Para o eixo padrão são adotados valores para a carga por roda, (2050 kgf); pressão de contatos

dos pneus (5,6 kgf/cm^2) e raio da área de contato (10,8 cm). O número N admissível é obtido em ensaios de fadiga e utilizado como dado de entrada para a obtenção de valores admissíveis para tensão e deformação e comparado com o tráfego real "N" utilizando-se o fator campo-laboratório. PINTO (1991) indica para este fator, após observações em rodovias federais por seis anos, valores de 10^4 para ensaios de fadiga à tensão controlada e 10^5 para ensaios à deformação controlada.

Critérios para Escolha e Definição da Base de Dados

Os dados para os SGPs em nível de rede, devem ser obtidos de forma criteriosa, devendo ser analisadas as informações que possam vir a comprometer a confiabilidade dos levantamentos, pela inserção de valores duvidosos colhidos em atividades fora do SGP. Deve ser efetuada uma filtragem dos dados para melhorar a confiabilidade das informações coletadas (MARCON, 1996). A qualidade dos dados que são coletados e usados determina o valor de um sistema de gerência (HAAS et al., 1994).

Para a administração efetiva das informações rodoviárias são requeridos objetivos bem definidos e informações apropriadas e atualizadas, de forma a orientar a coleta de dados com a qualidade e a quantidade necessárias. A qualidade da informação pode variar de acordo com o fim a que se destina, aumentando em intensidade, porém, diminuindo na extensão da cobertura analisada, obedecendo à seguinte seqüência: planejamento, programação, preparação e operação. A Tabela 2.8 apresenta uma classificação do que foi chamado por PATERSON & SCULLION (1990) de IQL (*Information Quality Level*) ou Índice de Qualidade da Informação.

No SGP em nível de rede (BERTOLLO e FERNANDES JR., 1997), as informações necessárias devem ser mais simples e demandar um menor intervalo de tempo para a sua obtenção. Preocupa-se com a escolha da melhor estratégia ("o que fazer"), em indicar a atividade mais apropriada ("como fazer"), em selecionar as seções prioritárias ("onde fazer"), com a definição da melhor época para execução dos serviços de M&R e a que custo aproximado ("quando fazer").

A tarefa de determinar como fazer, o que fazer e quando fazer serviços de restaurações nos pavimentos, pode ser desenvolvida por meio de modelagem como um problema de

otimização. A meta é maximizar a condição média da rede de rodovia para um horizonte de planejamento plurianual (TACK e CHOU, 2002).

Tabela 2.8 Classificação da coleta de dados para SGP pelo Índice de Qualidade da Informação IQL (PATERSON e SCULLION, 1990)

Nível de Qualidade de Informação	Descrição Resumida	Aplicação	Coleta de Dados
IQL - I	Rica em detalhes; Abrangente.	Pesquisa; Operações; Projetos avançados; Diagnósticos	Pequena, para extensões limitadas ou em únicas amostras com equipamentos especiais; Lenta, a exceção é para automação avançada.
IQL - II	Detalhada	Projetos (Preparação) Programação Planejamento avançado	Limitadas extensões com o uso de métodos semi-automáticos; ou total cobertura com equipamento automático de alta velocidade.
IQL - III	Resumo de detalhes e categorização dos valores	Programação; Planejamento; Projeto básico	Completa amostra para alta velocidade e métodos semi-automáticos de baixa precisão; amostras com baixa velocidade ou colhidas de outros dados.
IQL - IV	Muito resumida	Estatística; Projeto de rodovias de baixo volume de tráfego; Planejamento e programação linear simples.	Métodos manuais ou semi-automáticos, estimados ou processados.

Como aplicação de um SGP em nível de rede, PETERSON (1987), cita que:

- Para as atividades de M&R devem ser estabelecidos critérios, em função dos defeitos, para selecionar os projetos candidatos à intervenção;
- Critérios de priorização devem ser criados em função do desempenho, dos custos, do tráfego, etc.;
- Sejam estabelecidas, em função da avaliação das condições atuais e futuras do sistema, as necessidades orçamentárias dos órgãos rodoviários a curto e longo prazo, com alternativas de aplicação de recursos através de cenários.

2.1.3 Sistema de Gerência de Pavimentos em nível de projeto

No SGP em nível de projeto, observa-se mais detalhadamente um determinado trecho pavimentado. Os dados são coletados de forma mais intensa com estudos da estrutura das camadas do pavimento, determinando as causas do aparecimento de defeitos e as conseqüências que estes poderão induzir em camadas adjacentes, procurando avaliar e selecionar o tipo e a data de execução do serviço de manutenção e/ou construção.

Para este nível as decisões, além de administrativas, são técnicas e econômicas. Também, inclui a previsão da durabilidade do segmento após a execução de diferentes estratégias de manutenção e de reabilitação para cada segmento específico e a avaliação das causas de deterioração.

A inter-relação existente entre os dois níveis de SGP, em nível de rede e em nível de projeto, é que este último é o complemento do primeiro. Em nível de projeto, o direcionamento é para estudos específicos em trechos situados na rede viária em questão que foram priorizadas em nível de rede.

Inicialmente é feito um diagnóstico nos respectivos segmentos do pavimento, identificando por meio de avaliações funcionais e estruturais os problemas neles existentes. As alternativas de projeto são avaliadas, e em função da análise técnico-econômica é escolhida a mais adequada, permitindo-se que, além de implantar a construção, sejam efetuadas avaliações que possibilitem determinar as causas da deterioração e selecionar as estratégias mais adequadas para a manutenção (PETERSON, 1987).

Nos estudos de um SGP em nível de projeto, além da realização de ensaios de laboratórios, são efetuados levantamentos das quantidades e dos custos das diferentes alternativas de intervenção. Os benefícios advindos das melhorias da condição do pavimento e conseqüentemente da vida útil do pavimento são avaliados, as necessidades são quantificadas, as prioridades são estabelecidas contemplando programas e depois de selecionadas as estratégias, os custos são estimados (PETERSON, 1987). Enfim, o SGP em nível de projeto possibilita que seja feita uma melhor avaliação das causas de deterioração ensejando a seleção de estratégias que sejam mais adequadas para a manutenção dos trechos.

A caracterização da confiabilidade e de um bom uso de um SGP é constatada através de análises, da coerência dos resultados obtidos em nível de projeto com o planejamento em nível de rede, ou ainda, quando para as análises em nível de rede são adotados as próprias ferramentas e os métodos utilizados em nível de projeto. O que ocorre é que era imensa a dificuldade de se gerenciar uma grande quantidade de informações, há algumas décadas, pois não se dispunha, na época, de ferramentas computacionais de fácil utilização. A prática da gerência de pavimentos ao longo de sua existência (aproximadamente 40 anos) sempre necessitou de ferramentas e métodos mais simplificados e expeditos para sua viabilização em redes pavimentadas de maior extensão.

Na Figura 2.5 é mostrado um Fluxograma de um SGP com alternativas das estratégias de atividades de M&R. Inicialmente são definidas e identificadas as seções (ou segmentos) dos pavimentos para análise. O passo seguinte consiste em levantar as condições do pavimento, obtendo-se informações sobre as características físicas, o estado de deterioração, anotando-se as extensões e os níveis de severidade dos segmentos. A análise em nível de rede permite a escolha das alternativas das estratégias de M&R. Em seguida é efetuada uma análise em nível de projeto, para as definições das atividades de manutenção, ou, se for o caso, de dimensionamento de reforços ou de reconstrução. A partir destas definições são efetuadas as análises econômicas e estabelecidas às prioridades (FERNANDES, JR. et al., 2003).

A análise econômica permite que sejam avaliadas as alternativas de M&R e se constitui numa ferramenta de tomada de decisão, em função de critérios pré-estabelecidos. Devem ser levados em consideração nesta análise os fatores políticos, econômicos e sociais. A função social de uma rodovia não pode ser desprezada quando se efetua a análise da relação benefício/custo.

As análises das priorizações se fazem necessárias para que sejam otimizadas as aplicações dos recursos. A finalidade é maximizar os benefícios ou minimizar os custos sob restrições orçamentárias. Para a determinação das prioridades, podem ser estabelecidos procedimentos simples, por exemplo, em função do cálculo de um Índice de Prioridade (IP), a partir do conhecimento do Índice de Condição do Pavimento (ICP) e do efeito do tráfego (FERNANDES JR., 1997).

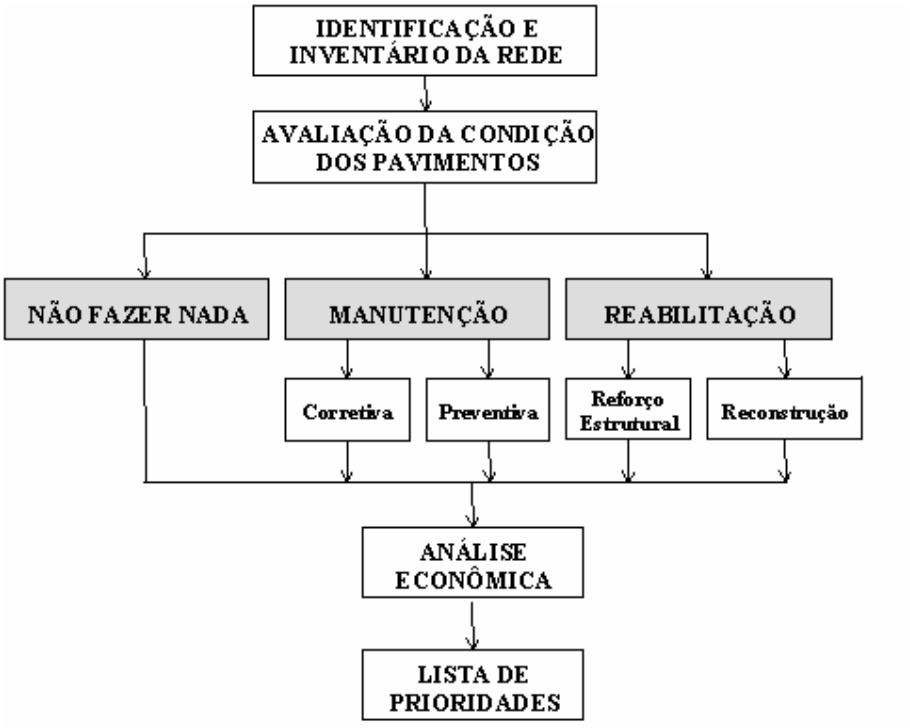


Figura 2.5 Fluxograma de um SGP com alternativas das estratégias de M&R (FERNANDES, JR. et al., 2003)

A equação do Índice de Prioridade, proposto por FERNANDES JR. (1997), com o efeito do tráfego incorporado, ou seja, o Tráfego Médio Diário (TMD), equivalente ao VMD, tem a seguinte forma, equação 2.6:

$$IP = \frac{\sqrt{\text{TMD}}}{\text{ICP}} \tag{2.6}$$

Da equação 2.6 verifica-se que será maior a prioridade quanto maior for o tráfego e pior for a condição do segmento ou trecho.

2.1.4 Implementação de um Sistema de Gerência de Pavimentos

Os Órgãos Rodoviários, de maneira geral, não detêm autonomia para definir a aplicação dos recursos financeiros para conservação e manutenção da sua malha rodoviária. Esta decisão geralmente é tomada por gestores da área financeira, sem maiores conhecimentos técnicos. Portanto, se faz necessária à existência de uma ferramenta com embasamento técnico confiável que expresse o estado atual e futuro da malha, caso não

sejam aplicados os recursos no momento adequado. A manutenção tardia desse patrimônio poderá gerar envelhecimentos precoces dos pavimentos, atingindo seu esgotamento num processo de deterioração irreversível. É nesse momento que a sociedade, através de seus usuários insatisfeitos, reclama por medidas urgentes para sanear a crise que poderia ser evitada com políticas de manutenção adequadas (BENEVIDES et al., 2004).

PATERSON (1987), destaca que a não aplicação de recursos na época devida, para a execução dos serviços de manutenção e restauração em diversas rodovias localizadas em países desenvolvidos, segundo levantamentos efetuados pelo Banco Mundial, acarretou em grandes prejuízos. A postergação na execução destes serviços ocasionou um substancial acréscimo nos custos inicialmente previstos, o que poderia ter sido evitado. Os custos para estes serviços passaram de 12 bilhões de dólares para 90 bilhões de dólares, à época.

Conforme PETERSON (1987), a administração de uma rede viária deve fornecer respostas para algumas das seguintes questões:

- O que acontecerá se nenhuma atividade de manutenção for efetuada ou se a manutenção for adiada em uma parte da rodovia?
- O que fazer se houver redução no orçamento? E também se esta redução implicar em que seções de pavimentos deixem de ser submetidas a intervenções de reabilitação?
- O que fazer se houver um acréscimo no limite legal para cargas por eixo dos veículos pesados?

A Figura 2.6, modificada de HAAS & HUDSON (1978), mostra a inter-relação entre o Índice de Serventia, a vida útil do pavimento e o efeito causado pela postergação na aplicação das atividades de manutenção requeridas. Verifica-se que o Índice de Serventia teve uma queda de 40%, após o pavimento consumir 75% de sua vida útil. Nos 17% seguintes de vida útil, o Índice de Serventia caiu mais 40% evidenciando a importância da intervenção de manutenção. Como se pode notar na Figura 2.6, ao se deixar de aplicar R$ 1,00 na época certa, com índice de serventia de aproximadamente 2,5, este valor passa de R$ 1,00 para R$ 4,00 se aplicado após grande perda de serventia (índice de serventia menor do que 1), implicando em um aumento de 300% no custo das atividades de manutenção, devido à postergação.

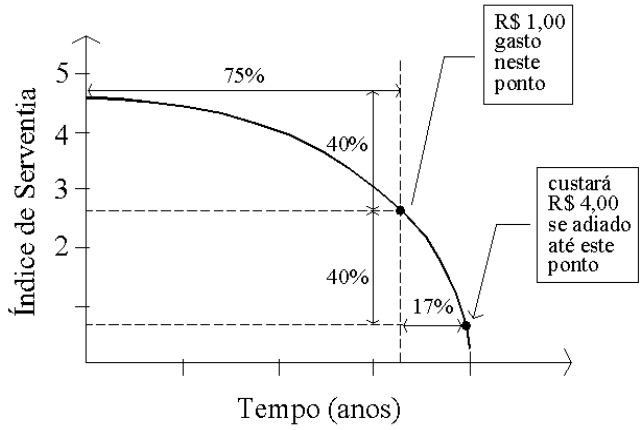


Figura 2.6 Inter-relação entre Índice de Serventia, a vida útil do pavimento e o efeito causado pela postergação na aplicação das atividades de manutenção (adaptado de HAAS &HUDSON, 1978)

A postergação das atividades de manutenção gera efeitos negativos em cadeia nos planejamentos do gerenciamento de uma rede viária. No exemplo acima, a análise se deteve a um trecho. Na realidade, o planejamento deve abranger o estudo de toda a rede, que apresenta segmentos com diferentes níveis de serventia.

No estabelecimento de um programa orçamentário deve-se ter respostas para questões como:

- Se houver uma redução de 30% ou de 20%, no orçamento, qual será o efeito na malha viária?
- Nos serviços de manutenção devem ser priorizadas as rodovias de melhor ou pior estado de conservação?
- O orçamento do ano seguinte deve ser o mesmo do ano anterior?
- Que tipo de atividade deve ser executado em uma determinada rodovia: reciclar, recapear, postergar com tapa-buracos ou reconstruir?

Para a implementação de um SGP, as informações históricas necessárias sobre a rede seriam obtidas por meio dos seguintes dados:

- Históricos das obras: de projetos, dos materiais utilizados, dos métodos executivos ("*as built*"), das ações de M&R com as respectivas datas, da qualidade da execução (controle tecnológico), dos tipos de defeitos mais freqüentes, dos procedimentos e processos de avaliações;

- Das características da via quanto: à classe de projeto, à classificação funcional e à geometria;
- De tráfego: o tipo e o volume de tráfego previsto e atual;
- Do meio ambiente: a temperatura, a umidade e a drenagem do local inspecionado.

A existência de um banco de dados confiável é fundamental. Caso este não exista, as informações acima elencadas, poderão ser agrupadas durante uma fase do SGP e originar um novo banco de dados.

Para uma política adequada de gestão da malha rodoviária é preciso que se estabeleça um planejamento das ações de conservação e manutenção. Para o desenvolvimento destas ações estão incluídos os seguintes fatores (BENEVIDES et al., 2004):

- Conhecimento da malha rodoviária conservada;
- Conhecimento das condições estruturais dos pavimentos;
- Conhecimento das condições estruturais e funcionais dos elementos rodoviários (extrapista);
- Definição dos serviços aplicáveis à conservação e manutenção da malha rodoviária;
- Elaboração de algoritmos para o cálculo estimado dos tipos e das quantidades de serviços necessários à conservação e manutenção;
- Determinação dos custos dos serviços previstos;
- Cálculo dos recursos necessários para garantir um nível de qualidade satisfatório para a malha rodoviária;
- Priorização das atividades de acordo com os recursos disponibilizados pelas fontes de financiamento da conservação e manutenção da malha;
- Elaboração dos Planos Periódicos de Conservação e Manutenção.

Um aspecto importante de ser destacado é o fato de que os resultados de uma gerência deficitária de uma rede pavimentada, que não contempla o estabelecimento adequado de Planos Plurianuais de Investimentos (PPI), somente são sentidos com o decorrer do tempo. A definição dos investimentos em manutenção por parte de um órgão rodoviário passa por um processo decisório de elevada complexidade. Os PPIs visam estabelecer as

prioridades para intervenções periódicas, bem como preestabelecer as soluções, os custos e as épocas adequadas.

O Planejamento, tanto Estratégico como Operacional, para expressar a realidade da malha rodoviária, tem que estar respaldado em informações que respondam às seguintes questões básicas (DERT, 2003; BENEVIDES et al., 2004):

- O conhecimento pleno do patrimônio existente é pré-requisito para o Planejamento de qualquer atividade. Um cadastro confiável complementado por um inventário dos elementos que compõem a estrutura em questão é a resposta para tal quesito.
- Um diagnóstico consciente das condições de conservação desses elementos, fundamentado em levantamentos técnicos reconhecidamente eficientes e simples, dará um retrato fiel da situação em que se encontra a estrutura em análise.
- O processamento das informações do cadastro e do inventário, combinado com as condições de conservação, ao conhecimento da demanda de tráfego (volume e carga), assim como das condições ambientais, resultará em um plano racional de metas coerentes com a realidade daquele universo estudado.

Um SGP é a expressão formal dos princípios modernos de administração. A sua formulação deve passar necessariamente pelas seguintes fases:

- Estimular e motivar o pessoal responsável pelo órgão para que o sistema seja implementado;
- Para a implementação deverá ser designado um coordenador ligado às áreas de planejamento e de manutenção;
- Definição dos objetivos a se atingir a curto, médio e longo prazo, em função das necessidades reconhecidas e das situações futuras possíveis;
- Determinação das realizações, em termos físicos e em termos econômicos (elaboração e execução de planos, programas plurianuais e orçamento);
- Controle de aplicação rigoroso, policiado por indicadores que permitam apreciar a eficácia da ação executada, medir os desvios de realizações/objetivos e realizações/previsões e, por conseqüência, reorientar o caso em análise para a política adotada.

A concepção de um SGP deve ser suficientemente flexível para se complementar, evoluir com a experiência adquirida, com o progresso dos conhecimentos e com a natureza e o volume dos dados disponíveis. Pode ser sugerido, simplificando a bem da clareza, que existe um SGP somente a partir do momento em que são abrangidos todos os elementos principais de um esquema decisivo: o levantamento das necessidades, os objetivos, as regras de seleção dos dados, a classificação dos trabalhos por ordem de prioridade, etc.

Na prática, o sistema deve oferecer um conjunto de cenários coerentes, saídos de diferentes séries de hipóteses, de forma a permitir que sejam testadas e comparadas as estratégias e políticas alternativas. Os resultados de saídas do SGP apresentados nos relatórios e gráficos, contendo as informações técnicas sobre as condições da rede, darão embasamento às decisões tomadas pela administração quanto às atividades a serem implementadas.

Desta forma, duas razões principais justificam a característica de iteração dos sistemas:

- A necessidade de se promover modificações em função dos resultados obtidos e da avaliação de sua eficácia (efeito "*feedback*"); e,
- O fato de os sistemas constituírem um instrumento de simulação e de análise de sensibilidade, em torno da variação de um ou outro parâmetro de entrada (relativo aos objetivos, aos meios, às regras de decisão, etc.) e da própria análise de sensibilidade.

Certas variáveis, tomando como exemplo alguns parâmetros de comportamento dos pavimentos, devem ter os seus processos de progressão regidos através de leis de evolução no tempo, que o sistema deve necessariamente conhecer. Relativamente ao estado dos pavimentos, existem alguns métodos de estabelecimento de leis de evolução, entre os quais podem ser citadas (PATERSON, 1987):

- **As leis gerais**, estabelecidas através de pesquisas e de experiências diversas. Na falta de dados mais precisos sobre o comportamento de trechos de estradas individuais, essas leis podem ser utilizadas nos sistemas de gerência na escala do conjunto (ou subconjunto) da rede;

- **A análise da regressão** de uma série temporal de dados, capaz de permitir definir a tendência de evolução a curto e médio prazo, para cada trecho de estrada em função das intervenções realizadas;
- **A cadeia de Markov,** que permite estabelecer, a partir de um estado do pavimento, definido *a priori*, e da combinação de vários parâmetros, a probabilidade de passagem de um estado a outro, em função dos trabalhos de manutenção realizados e de métodos estatísticos (BUTT et al., 1988).

Contudo, deve ser ressaltado na aplicação destes métodos, a importância da experiência e a opinião dos engenheiros rodoviários. Deve haver maior mobilização e valorização destes profissionais, quer pela sua representatividade, quer pela sua vivência ou experiência.

Complementando as características essenciais de um Sistema de Gerência, outras propriedades devem ser ainda mencionadas:

- O processo de otimização, ou seja, o processo de seleção sob restrição financeira (no tempo e no espaço), o qual deverá permitir, entre outras vantagens, produzir ordens e prioridades nas ações a realizar;
- O controle de atividade em toda a escala da Gerência; este é um ponto fundamental que se baseia na explicitação dos critérios de seleção e dos motivos de ação;
- O tempo entre o início da implementação e a operação do SGP, que pode variar entre um e dez anos. HAAS et al. (1994) estimam um período entre 24 e 35 meses para que seja alcançado o estágio operacional de um SGP.

No âmbito rodoviário, as primeiras realizações significativas dos Sistemas de Gerência, desenvolveram-se na década de 70, principalmente na América do Norte (Estados Unidos e Canadá). Nos anos 80, esses sistemas continuaram a serem desenvolvidos em diversos estados norte-americanos e províncias do Canadá. Por outro lado, sistemas semelhantes foram também desenvolvidos e implantados em vários países da Europa Ocidental (França, Alemanha, Holanda, Espanha, etc.), assim como na África do Sul (VISSER et al., 1998), Kwait (KARAN et al., 1998) e Paquistão (CHEN e RAZA, 1998).

De modo geral, a implementação do SGP, nesses países, permitiu a introdução de mudanças e/ou melhoramentos que possibilitaram a aplicação de novas técnicas. Modificações nos sistemas foram introduzidas à luz de experiências adquiridas e em alguns países, como, por exemplo, no caso da Espanha, a implementação do SGP foi efetuada em estágios (BOLÍVAR e ACHÚTEGUI, 1998).

Na França, a adoção de uma política de descentralização no domínio de Gerência Rodoviária, implantada por meio de uma acentuada autonomia de decisão em nível departamental, favoreceu, de maneira significativa, a implementação de bases de dados rodoviários e de modelos de sistemas de gerência. Foram adotados três módulos especializados de gerência de rodovias, agrupados com a denominação GIRR (*Gestion Intelligente des Réseaux Routiers* – IMRN – *Intelligent Management of Road Networks)*. Esses módulos fornecem informações para um sistema gerenciador de banco de dados, o VISAGE, possibilitando, na saída deste sistema, edição de mapas rodoviários, esquemas de rotas, obtenção de valores e gráficos estatísticos (LEPERT e JOUBERT, 1998).

No Brasil, conforme citado anteriormente, o primeiro SGP foi implantado pelo DNER, hoje DNIT, para a sua malha rodoviária federal, por meio de sua Divisão de Planos e Programas, na época. O objetivo foi efetuar uma análise plurianual de investimentos, estabelecer prioridades e calcular custos.

Considerando a fundamentação dos Sistemas de Gerência de Pavimentos, julga-se poder agrupá-los nas seguintes linhas:

1. Tipos de Sistemas:

    - Gerência de Pavimentos Rodoviários;
    - Gerência de Equipamentos;

2. A maioria dos Sistemas de Gerência de Pavimentos Rodoviários, dizem respeito apenas à manutenção dos pavimentos, que representam uma parte crescente dos orçamentos rodoviários.

3. Outro aspecto importante a referir neste âmbito, é a evolução doutrinal que se tem verificado. Com efeito, os primeiros tempos foram marcados por tentativas de

concepções teóricas de sistemas, procurando correlacionar a evolução do estado dos pavimentos com a evolução dos custos suportados pelos usuários. A esta fase sucede-se um período mais pragmático, no qual se passou a conceber Sistemas de Gerência menos ambiciosos, sem integrar os custos dos usuários.

As linhas citadas acima se desenvolveram face à necessidade fundamental de preservação do patrimônio existente, sem dúvida alguma a prioridade maior, em nível dos países industrializados e desenvolvidos. Deve-se salientar, a propósito, o caso particular dos Estados Unidos, onde foi implementado um vasto programa de reabilitação da rede interestadual, particularmente degradada após uma fase de submanutenção crônica. Este programa teve como fundamentação a extensa base de dados dos estudos do *Long Term Pavement Performance - LTPP* - do *Strategic Highway Research Program – SHRP* que tem o *Datapave* como gerenciador do banco de dados (LTPP, 2002).

O objetivo de preservação do patrimônio, é atingido comparando diferentes investimentos – em nível de projeto e em nível de rede – e coordenando as diferentes atividades intervenientes na planificação dos investimentos: o dimensionamento, a construção, a manutenção e a avaliação periódica do comportamento dos pavimentos (monitoramento).

Desta forma, as principais tarefas da Gerência dos Pavimentos são:

- Avaliação periódica da qualidade dos pavimentos, baseada em medições e observações objetivas, incorporando eventualmente avaliações subjetivas;
- Previsão do comportamento futuro, através de modelos de previsão do comportamento dos pavimentos. Estes modelos são normalmente desenvolvidos ou aperfeiçoados a partir de séries históricas obtidas nas avaliações periódicas;
- Determinação da data e das estratégias de manutenção mais oportunas; e,
- Preparação de programas anuais e plurianuais de manutenção, otimizados relativamente às restrições orçamentárias, através da definição racional de prioridades na execução dos trabalhos.

Os predicados essenciais de um sistema gerencial são estabelecidos de forma que ele permita processar:

- Análises objetivas, da forma mais exaustiva possível, dos parâmetros técnicos e econômicos necessários à sua elaboração;
- Atualização sistemática dos programas plurianuais, de modo a constituírem um elemento dinâmico de ajuda à programação de investimentos;
- Tomadas de decisões homogêneas e seguras, eliminando-se ao máximo as opções arbitrárias e subjetivas, as distorções locais e regionais, etc.

Assim, o desenvolvimento de um Sistema de Gerência de Pavimentos, para garantir sua adequada operacionalidade, implica nas seguintes condições importantes:

- Decisão e apoio da direção do órgão de implantar um SGP;
- Estabelecimento dos grupos de trabalho e de gerência;
- Conhecimento das necessidades do órgão;
- Adoção de critérios de decisão, de priorização e de modelos de otimização dos recursos disponíveis e modelos de previsão antes e após intervenções.
- Ser multidisciplinar e consensual, de forma a manter uma estreita colaboração entre os intervenientes técnicos e econômicos (decisões tomadas na base do consenso);
- Apoiar todas as decisões em dados objetivos e atualizados.

Esta última condição implica na montagem de uma infra-estrutura de avaliação dos pavimentos (medições, obtenções e tratamentos dos dados) e no desenvolvimento de um adequado e completo banco de dados rodoviários, peça-chave de um Sistema Gerencial.

Especificamente para o caso rodoviário, tendo-se em conta os diversos domínios de competência, as tarefas fundamentais e os predicados de um Sistema Gerencial, devem ser compostas por cinco grandes atividades, completamente integradas:

- Planejamento;
- Projetos;
- Construção;
- Manutenção;

- Avaliações dos pavimentos.

O planejamento inclui a obtenção de dados de tráfego, a apreciação das deficiências da rede, o estabelecimento de prioridades e a preparação de um programa de execução de trabalhos. As decisões fundamentais com respeito aos investimentos, tendo em conta as restrições orçamentárias, deverão ser tomadas nesta etapa.

A fase de projeto consiste na análise dos dados com séries históricas relativas aos materiais constituintes, aos estados funcionais e estruturais dos pavimentos, ao tráfego, ao clima, aos custos, concluindo com o estudo das soluções viáveis. As alternativas corretivas de investimento são em seguida submetidas finalmente a uma análise de viabilidade técnico-econômica para definir a solução final.

A etapa de construção compreende atividades como o calendário dos trabalhos, a administração das operações de construção, o controle de qualidade e o tratamento dos dados recolhidos.

A manutenção inclui o estabelecimento de um programa com calendário dos trabalhos (cronograma) resultante de considerações financeiras, as operações de manutenção e a obtenção e tratamento de dados.

A fase de avaliação dos pavimentos compreende a definição de trechos de controle, a avaliação periódica de parâmetros de comportamento relacionados com as características funcionais – estados superficiais e as irregularidades longitudinais e transversais – e estruturais do pavimento, a aderência, o tráfego, etc. A avaliação comporta também a análise e a obtenção de dados para utilização em outros setores do Sistema de Gerência, por exemplo, projeto de reforço.

A base de dados deve ser atualizada, ter um acesso seguro e um conteúdo confiável. Relativamente às pesquisas, como fase de um Sistema de Gerência, ela depende das necessidades particulares de cada organismo, podendo-se salientar, entretanto, a sua importância como meio de melhorar qualquer Sistema de Gerência e as atividades a ele ligadas. A investigação deve ser realizada simultaneamente em diversos domínios e direções (teórico, prático, materiais, equipamentos, etc.).

Na Figura 2.7 são mostrados os principais dados de saída usualmente fornecidos pela análise de desempenho dos pavimentos. Em função da idade dos pavimentos são estudados nesta análise, a capacidade estrutural, o conforto ao rolamento, a medida de defeitos e a resistência à derrapagem, além da análise econômica. Também em função da idade dos pavimentos, são analisados os custos de manutenção e os custos operacionais.

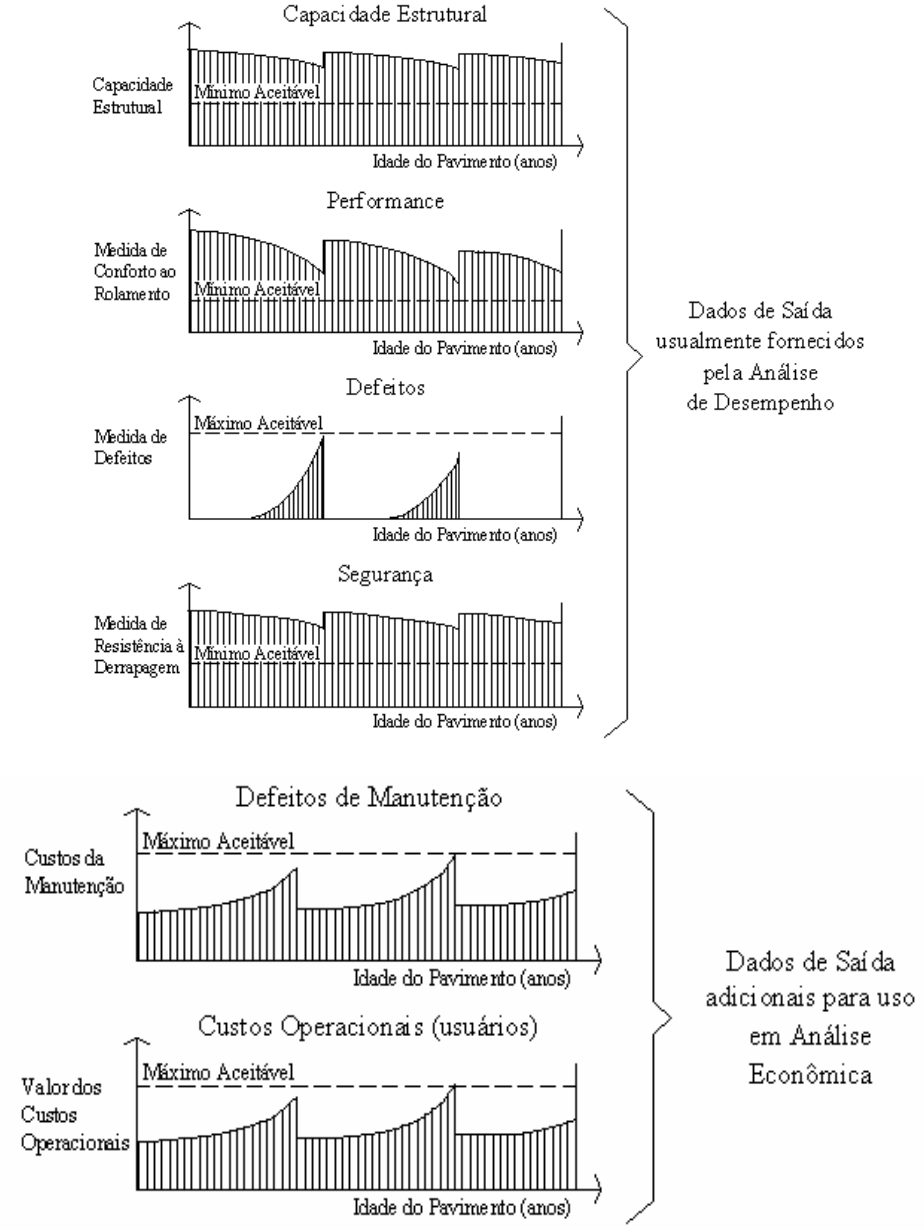


Figura 2.7 Principais Dados de Saída de uma Avaliação de Pavimentos para Análise de Desempenho e Análise Econômica (adaptado de HAAS & HUDSON, 1978)

2.2 Avaliação de Pavimentos

2.2.1 Generalidades

Na implementação do SGP, a avaliação de pavimentos é uma das etapas mais importantes por ser o ponto de partida para as futuras decisões neste sistema. Esta atividade possibilita que sejam estudadas as condições estruturais e funcionais dos pavimentos, adotando-se os procedimentos e as metodologias que melhor se adeqüem às características dos trechos de uma malha viária.

O objetivo fundamental dos procedimentos para avaliação de pavimentos e a realização de ensaios de laboratório, é fornecer dados para projetos de reabilitação e de manutenção e para o Sistema de Gerência de Pavimentos. Estes procedimentos devem ser adequados às características dos pavimentos da rede em estudo para que se possam atingir as metas almejadas.

No AASHO Road Test, estudos iniciados em agosto de 1956, em Otawa, Illinois, CAREY e IRICK (1960) usaram o conceito de serventia nas avaliações subjetivas para determinar o estado de deterioração dos pavimentos. Este estudo também apresentou, como importante contribuição, o estabelecimento de procedimentos para o desenvolvimento de equações que relacionam a serventia, com os carregamentos aplicados e com a espessura do pavimento.

Diversos fatores são intervenientes no desempenho de um pavimento e a evolução dos defeitos ao longo de sua vida útil. Esses fatores são traduzidos nas diversas variáveis a serem definidas que retratem as mudanças de estado e de comportamento deste pavimento. As principais variáveis a serem avaliadas são (PATERSON, 1987):

- Comportamentos funcional e estrutural: irregularidade, deflexões, atrito pneu-pavimento, profundidade de trilha de roda e defeitos superficiais;
- Tráfego: volume e classificação dos veículos, carga por eixo, tipo de eixo, pressão de enchimento dos pneus, tipo de suspensão e distribuição horária do fluxo;
- Clima: variações de temperatura, pluviometria e teor de umidade nas camadas;

- Manutenção e reabilitação: alteração das condições funcionais e estruturais provocadas pelos serviços de manutenção e reabilitação e registro dos parâmetros relativos às intervenções efetuadas;
- Características físicas e químicas dos materiais de construção.

A condição estrutural do pavimento indica por quanto tempo este manterá um nível adequado de condição funcional ou serventia. A condição de um pavimento num determinado instante da observação, representa o nível de degradação resultante do processo de deterioração (DNER, 1998).

A avaliação da condição funcional da superfície do pavimento permite que sejam estimados o conforto e a segurança que estão sendo oferecidos aos usuários. A estimativa pode ser feita de forma subjetiva, utilizando-se pessoas que transitam pelo trecho e dão notas, por exemplo, de zero (0) a cinco (5), associando assim a nota subjetiva aos defeitos dos pavimentos (MEDINA, 1997).

Na pista experimental da AASHO Road Test foram realizadas avaliações subjetivas dos pavimentos para medir a serventia, com os avaliadores atribuindo notas que variavam de 0 (muito fraco) a 5 (muito bom). A média destes valores atribuídos foi denominada "*Present Serviceability Radio*" - PSR. Este índice tem o seu equivalente no Brasil, o Valor de Serventia Atual, VSA, adotado na norma DNIT 006/2003 – PRO, antiga DNER PRO 07/94, com os seguintes conceitos apresentados na Tabela 2.9 (DNER, 1998).

Tabela 2.9 Valores da Serventia × Conceitos (DNER, 1998)

VSA	CONCEITO
0 a 1	Péssimo
1 a 2	Ruim
2 a 3	Regular
3 a 4	Bom
4 a 5	Ótimo

As condições superficiais de um pavimento são avaliadas de forma subjetiva, através de índices de serventia, ou objetiva, como, por exemplo, através da irregularidade longitudinal. Este parâmetro internacionalmente utilizado é medido por uma escala de referência conhecida como IRI - Índice de Irregularidade Internacional *(International Roughness Index)*, e, devido a sua fundamental importância neste trabalho, será abordado mais adiante de forma mais detalhada.

Inicialmente, na fase de estudos de avaliação, deve ser procedida uma acurada análise das condições atuais dos pavimentos. Em seguida, deve ser efetuada a identificação dos principais tipos de deterioração presentes, assim como identificar as seções ou segmentos uniformes e avaliar as suas deficiências por meio de levantamento dos defeitos de superfície, para que sejam definidos os parâmetros de comportamento, assim como as características físicas (NCHRP 35, 2001).

As condições dos pavimentos de uma malha viária sofrem variações ao longo de sua extensão. Isto se deve às características físicas e de condições, que tornam imprescindíveis dividir a malha viária em segmentos. Os procedimentos comumente utilizados consistem em: (1) adotar segmentos com extensão fixa, por exemplo, aproximadamente 200 metros, e (2) dividir em segmentos homogêneos.

A divisão em extensão fixa apresenta uma grande desvantagem uma vez que pode haver diversidades nas características estruturais dos pavimentos. Os segmentos homogêneos de extensões variáveis devem apresentar o mesmo tipo de constituição de estrutura (mesmo tipo de revestimento, base, sub-base e subleito), o mesmo tipo de materiais das camadas e espessuras, a mesma incidência de tráfego e a mesma situação climática (DNER, 1998).

Em 1987 o programa SHRP deu início a maior pesquisa de desempenho de pavimentos, recomendando a criação do LTPP - *Long-Term Pavement Performance*. Durante os vinte anos do programa, agências de rodovia nos Estados Unidos e em 15 (quinze) outros países terão coletados dados de condição de pavimento, de clima, de volumes de tráfego e de cargas de milhares de segmentos de pavimentos. Estas informações servirão de base e serão de grande importância para os engenheiros que projetam pavimentos (SHRP/FHWA, 2003).

Os dados do LTPP são muito úteis para os propósitos de definição da variabilidade de dados de entrada no projeto de pavimentos porque é um estudo que tem bastante consistência. Praticamente todas as regiões dos Estados Unidos e províncias Canadenses, são referidas nos banco de dados e verificadas as seções de pavimentos. Além disso, o banco de dados é muito extenso e as informações coletadas estão bem localizadas e bem distribuídas geograficamente, permitindo assim a averiguação da variabilidade de dados de entrada em quatro grandes categorias no projeto de pavimentos (LTPP, 2002b).

O Manual de Identificação dos Defeitos para a LTPP (FHWA/SHRP, 2003), em sua quarta versão, a primeira foi em 1987, incorpora refinamentos, mudanças, e novas diretrizes do programa SHRP/LTPP que têm acontecido com o passar do tempo.

No Brasil, o Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT, antigo DNER), por meio da Diretoria de Planejamento e Pesquisas/Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) está realizando a pesquisa Avaliação de Desempenho de Pavimentos Típicos Brasileiros. Neste estudo foram avaliados 40 (quarenta) trechos-teste representativos da malha rodoviária federal, seguindo os mesmos procedimentos do programa SHRP/LTPP. O programa do DNIT, que foi iniciado em dezembro de 2001 e tem um prazo mínimo de duração de cinco anos, o mesmo prazo previsto inicialmente para o SHRP/LTPP, está sendo realizado em duas etapas (DNIT, 2004):

- A primeira etapa consistiu na determinação dos 40 (quarenta) trechos-teste selecionados entre as rodovias integrantes do SGP do DNIT. Os dados coletados nestes trechos permitiram a verificação e o comportamento das estruturas dos respectivos pavimentos. Um grande destaque, nesta etapa, foi o desenvolvimento de um banco de dados e de um software gerenciador de dados que possibilita o intercâmbio de informações com as do sistema SHRP/LTPP;
- Na segunda etapa está previsto o monitoramento dos trechos-teste que tem como meta a obtenção de curvas de desempenho dos pavimentos e aprofundamento do intercâmbio com o programa SHRP/LTPP e com outros países integrantes deste programa.

DOMINGUES (1993a) destaca que, ao se avaliar um pavimento, deve ser considerado, além das normas técnicas, o padrão da rodovia e que sejam ainda atendidas às

necessidades do usuário. Conseqüentemente, deve haver compatibilidade com a política adotada pelo órgão responsável. Há visíveis diferenças nas necessidades de um pavimento de uma auto-estrada se comparadas com as de uma rodovia vicinal. Cada pavimento deve ser avaliado de uma forma que seja compatível com as características e com o padrão da rodovia, assim como com as categorias de veículos que utilizam a via.

As condições funcionais e estruturais de um pavimento devem ser avaliadas por procedimentos adequados às suas características, utilizando-se várias metodologias para levantamento de defeitos que surgem na superfície dos pavimentos. Vários fatores, tais como clima, solicitação do tráfego, características dos materiais e processos construtivos, atuando de forma isolada ou simultânea, são as causas destes defeitos. De modo geral, estas metodologias objetivam:

- Avaliar as condições de superfície do pavimento relativas ao conforto e à segurança oferecidos aos usuários;
- Elaborar um inventário das principais ocorrências observadas pela presença de defeitos na superfície dos pavimentos asfálticos;
- Determinar por meio de medições, os fatores que causaram os defeitos na superfície dos pavimentos.
- Descrever e caracterizar os defeitos, identificando o tipo, a severidade e a densidade.

No levantamento das avaliações das condições dos pavimentos, é imprescindível que sejam definidos (HAAS et al., 1994; AASHTO, 1993; KUO, 2003):

- Os segmentos de pavimentos (com todos os detalhes, tais como: condição atual etc.);
- Seleção e verificação da eficácia das alternativas de M&R;
- Um plano de investimento em função das restrições orçamentárias para estabelecer as prioridades;
- Estabelecimento de modelos de curvas para previsão de deterioração;
- Determinação dos parâmetros que serão utilizados para a previsão da taxa de deterioração;
- Criação de um banco de dados com as informações originadas do inventário e de um cadastro.

2.2.2 Levantamento de defeitos

O levantamento de defeitos tem como finalidade a identificação e a quantificação da extensão da área afetada e da severidade em cada tipo de defeito. Estas informações possibilitam que sejam avaliadas e monitoradas as condições do pavimento em função do tempo, caracterizando a condição do pavimento e estabelecendo as causas da deterioração. É essencial coletar dados sobre a localização e a evolução de cada tipo de defeito para que possam ser estabelecidas e definidas as estratégias de intervenção e as atividades de M&R (MARCON, 1996; YSHIBA, 2003).

Fatores mais comuns considerados na seleção de alternativa de reabilitação mais apropriada são:

- Condição atual do pavimento quanto à qualidade de rolamento e aos defeitos de superfície;
- Solicitação de tráfego no passado e no futuro, em termos de número de repetições de carga por eixo padrão durante o período de projeto;
- Capacidade estrutural do pavimento existente.

Os pavimentos, segundo o *Strategic Highway Reserch Program* (SHRP, 1993) podem, por diversas razões, apresentar uma gama variada de patologias, que a partir de agora serão denominadas de defeitos. Os defeitos nos pavimentos se refletem em danos na superfície, e podem ser causados por imperfeição nas construções, pelo meio ambiente e também por solicitação imposta pelo tráfego. Eles afetam a serventia, as capacidades funcionais e estruturais dos pavimentos, causando desconforto aos usuários. Um defeito na sua fase inicial, por exemplo, uma trinca, caso não seja devidamente selada, pode causar o agravamento das condições inadequadas do pavimento. As trincas, uma vez iniciadas, tendem a aumentar a sua extensão, enfraquecem o revestimento e aumentam a severidade e a velocidade de deterioração dos pavimentos.

As trincas têm um impacto significativo na evolução das deformações nas trilhas de roda e da irregularidade longitudinal. O trincamento se constitui, ao longo do tempo, em um critério importante para definição das intervenções de recuperação do pavimento (DNER, 1998).

Conforme DNIT 007/2003 PRO (antiga DNER-ES 128/83), a trinca é definida como "*qualquer descontinuidade na superfície do pavimento, consistindo em aberturas de maior ou menor porte, apresentando-se sob diversas formas*" e a definição da classe da trinca é feita de acordo com a abertura que a mesma apresenta como a seguir discriminada:

- Trincas Classe 1: trincas capilares isoladas, com abertura de até 1 mm.
- Trincas Classe 2: trincas interligadas, com abertura superior a 1mm, sem desintegração ou erosão nas bordas.
- Trincas Classe 3: trincas interligadas, com abertura superior a 1mm, com desintegração ou erosão nas bordas.

Ao ser detectado em um pavimento um determinado tipo de defeito, existe grande possibilidade de que o surgimento deste defeito esteja associado a um estágio avançado de um outro tipo. Há um amplo inter-relacionamento entre os defeitos na superfície dos pavimentos dificultando as análises que diagnostiquem as causas, as ocorrências e as evoluções particulares (VILLIBOR e FORTES, 1997).

Os defeitos de classes funcionais são associados à qualidade de rolamento e à segurança do pavimento. Exemplos: os afundamentos de trilhas de roda e a exsudação. **Os defeitos de classes estruturais** são associados à perda de capacidade do pavimento em suportar as cargas que o solicitam. Exemplo: descontinuidade provocada pelo trincamento por fadiga de alto nível de severidade (DOMINGUES, 1993c).

2.2.3 Danos causados aos pavimentos pela água

Os construtores, desde a Antigüidade, sabiam que a água é o maior inimigo dos pavimentos estáveis e duradouros. Os antigos romanos, que iniciaram a construção de uma rede viária de 80.000 km no ano 312 a.C., sabiam dos efeitos danosos da água e procuraram manter suas estradas acima do nível dos terrenos circunvizinhos.A razão completa da deterioração e falência dos pavimentos é muito complexa e tem a contribuição de muitos fatores. A idade e a oxidação das películas de asfalto colaboram na deterioração dos revestimentos de concreto asfáltico e bases. Certos processos de deterioração e fadiga, sob deformações repetidas, são importantes fatores que contribuem para o trincamento e a desintegração dos pavimentos.

Os pavimentos possuem grandes áreas expostas às intempéries e ao tráfego. Sob as ações combinadas das mudanças de temperatura, chuvas, oxidação, congelamento e degelo (para regiões frias), e ainda tensões e deformações causadas pelos impactos do tráfego, vários tipos de ações danosas têm lugar e encurtam a vida, aumentam a rugosidade, colocam material desagregado sobre a superfície e, eventualmente, destroem muitos pavimentos.

A água é um dos fatores que lideram os danos causados aos pavimentos. Altos custos de reparação e reconstrução nas principais rodovias são, freqüentemente, associados às rodas pesadas e aos impactos das mesmas sobre estruturas contendo água livre. Algumas das mais prejudiciais ações do tráfego e da água ocorrem inteiramente dentro da estrutura do pavimento, e não estão relacionadas com a capacidade de suporte ou comportamento do subleito, individualmente. À medida que a quantidade de água contida nas bases e sub-bases cresce, dá-se uma redução da capacidade de suporte e um crescimento da razão de perda de serventia dos pavimentos. Quando a água livre preenche completamente estas camadas, e também os vazios e os espaços ou aberturas nos limites entre as camadas, as rodas pesadas aplicadas à superfície desses pavimentos, produzem impacto sobre a água que é comparável a uma ação do tipo golpe de aríete.

As pressões pulsantes da água que podem surgir nessas ocasiões, sob o impacto das rodas, não causam somente erosão e ejeção de material para fora do pavimento, mas também podem desprender capas asfálticas de bases e sub-bases estabilizadas com betume. As ações da água podem desintegrar bases estabilizadas com cimento portland, enfraquecer bases granulares pelo rearranjo da estrutura interna dos materiais de granulação fina das misturas de agregados, sobrecarregar subleitos, onde as espessuras totais forem inadequadas, e causar diversas outras ações prejudiciais.

Um dos piores problemas, no entanto, causados pelo excesso de água está no acúmulo de água na superfície dos pavimentos, o que pode causar a aquaplanagem, que traz o perigo de acidente iminente para os passageiros dos veículos quando não há adequado atrito pneu-pavimento.

2.2.4 Avaliação de defeitos

Na literatura são citados vários procedimentos para registrar os defeitos para a avaliação da superfície dos pavimentos. AASHTO (1986); SHAHIN e WALTER (1990); DOMINGUES (1993c); HAAS (1994); DNER (1998); SHRP (1993 e 2003), dentre outros, relacionam os tipos de defeitos observados em pavimentos. Como esta pesquisa será direcionada para os pavimentos asfálticos da malha rodoviária estadual do Ceará, apenas serão abordados os defeitos verificados neste tipo de pavimento. Os defeitos verificados em pavimentos asfálticos estão relacionados, em sua maioria, às trincas, à deformação permanente nas trilhas de roda, aos buracos e as panelas, ao desgaste do agregado, ao bombeamento e a exsudação (HAAS, 1994). Os tipos de trincamentos nos pavimentos asfálticos são:

- Por fadiga: causam defeitos resultantes do carregamento sucessivo.
- Por envelhecimento: o ligante betuminoso tende a romper pela perda de seus elementos mais leves (maltenos).
- Por reflexão: ocorre quando a superfície do revestimento asfáltico é atingida por um trincamento proveniente de uma camada inferior.
- Devido à variação da temperatura: uma alta redução na temperatura, resulta na combinação da retração térmica e da alta rigidez do ligante betuminoso.

Na avaliação da deterioração dos pavimentos deve ser verificado e acompanhado o desempenho estrutural fazendo com que o investimento seja preservado e também que se possa estabelecer o tempo certo para a execução da atividade de reabilitação por um menor custo. Um pavimento que mantém sua integridade estrutural não apresenta defeitos relevantes, não estando assim propenso ao colapso repentino. A Tabela 2.10 (DNER, 1998) resume os modos de deterioração em função de três categorias de defeitos: trincamento, deformação e desagregação, além das causas genéricas e específicas.

Tabela 2.10 Deterioração em função de três categorias de defeitos (DNER, 1998)

CATEGORIA DO DEFEITO	CAUSA GENÉRICA	CAUSA ESPECÍFICA
Trincamento	Associada com tráfego	Cargas repetidas (fadiga) Carga excessiva Escorregamento de capa
	Não associada com tráfego	Mudanças de umidade Mudanças térmicas Retração (propagação)
Deformação	Associada com tráfego	Carga excessiva (cisalhamento) Fluência plástica Densificação (compactação)
	Não associada com tráfego	Expansão Consolidação de substratos
Desagregação	Associada com tráfego	Degradação do agregado
	Não associada com tráfego	Falta de qualidade dos materiais

A deformação total no ensaio de compressão triaxial de carga repetida é a soma de duas parcelas de deformações: a permanente (εp) e a recuperável (εr). A partir da determinação da parcela da deformação recuperável, calcula-se o módulo resiliente do material através da expressão 2.7, a seguir:

$$Mr = \sigma_d / \varepsilon_r \qquad (2.7)$$

onde:

Mr – módulo de resiliência;

σ_d – tensão desvio (σ_1 - σ_3), é a tensão que na verdade é aplicada vertical e repetidamente no corpo de prova durante a execução do ensaio;

σ_1 – tensão principal maior aplicada no sentido axial;

σ_3 – tensão total aplicada no sentido radial, que no ensaio é a tensão confinante aplicada na câmara triaxial correspondendo as tensões principais menor e intermediária.;

ε_r – deformação específica axial recuperável, correspondente a um número particular de repetições da tensão desvio.

A partir da parcela permanente nos ensaios dinâmicos se desenvolvem modelos de previsão de afundamentos. As deformações permanentes (PATERSON, 1987) incluem as deformações plásticas no revestimento, os afundamentos de trilha de roda, escorregamento do revestimento betuminoso e as depressões. Há um acréscimo na irregularidade longitudinal causado por estes defeitos. Na Tabela 2.11, (PATERSON, 1987 e DNER, 1998), são sumarizadas as causas das deformações permanentes associando ao tráfego ou não.

As curvas típicas de deformação permanente são apresentadas na Figura 2.8. A curva A representa um pavimento adequado em termos de estrutura e de tipos de materiais utilizados. Observa-se que a deformação ocorre principalmente devido à densificação. O formato côncavo da curva e a assíntota apresentada sugerem uma pós-compactação até atingir-se o grau de densificação que deveria ter sido atingido durante o processo construtivo. Quando um pavimento não é adequado em termos de espessuras ou qualidade dos materiais, a deformação plástica tende a apresentar o comportamento, representada pela curva B, em que a fluência plástica domina. Isto poderia ser típica de um pavimento subdimensionado ou da utilização de asfaltos de baixa viscosidade em camada asfáltica muito espessa. As curvas C ou D ocorrem quando aparecem as trincas e a água ingressa em um pavimento tipo A, sem a conservação adequada. A velocidade com que a deformação cresce diferencia C de D. A curva E indica pavimentos com problemas sazonais de temperatura e de umidade (PATERSON, 1987).

Tabela 2.11 Causas e tipos de deformações permanentes associadas ou não ao tráfego (PATERSON, 1987 & DNER, 1998)

CAUSA GERAL	CAUSA ESPECÍFICA	EXEMPLO DE DEFEITO
Associada com o carregamento	Carregamento concentrado ou em excesso	Fluência plástica (ruptura por cisalhamento)
	Carregamento de longa duração ou estático	Deformações ao longo do tempo
	Grande número de repetições de carga	Afundamentos nas trilhas de roda
Não associada com o carregamento	Subleito constituído de solo expansivo	Inchamento ou empolamento
	Solos compressíveis na fundação do pavimento	Recalque diferencial

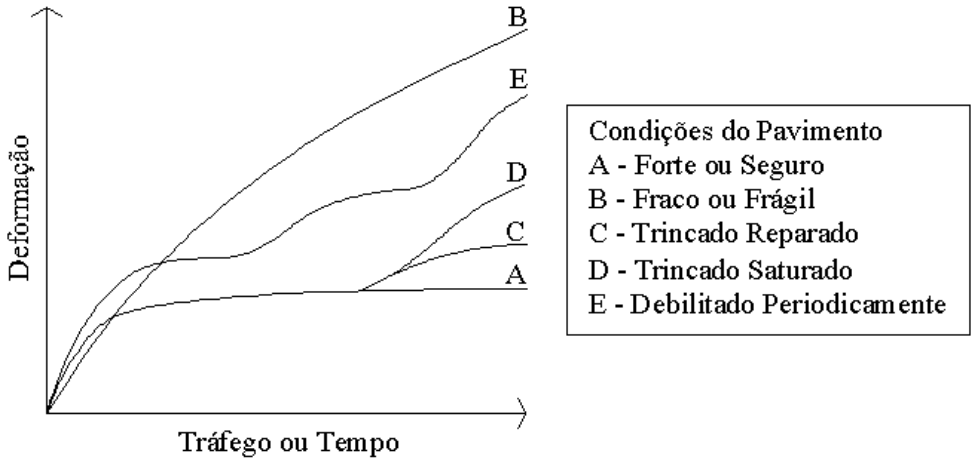


Figura 2.8 Curvas típicas de deformação permanente incluindo os efeitos de ingresso de água nas trincas e de manutenção (modificada de PATERSON, 1987)

2.2.5 Descrição de defeitos

Vários manuais, catálogos e publicações sumarizam os tipos de defeitos nos revestimentos asfálticos. Apesar da diversidade de informações, existe uma analogia e uma boa padronização entre os defeitos apresentados nos manuais e publicações da AASHTO (1986); SHRP (1993 e 2003); DOMINGUES (1993c) e DNER (1998).

A seguir são citados alguns manuais de levantamento de defeitos encontrados na literatura:

1. AASHTO (1986), apresenta 17 (dezessete) tipos de defeitos em pavimentos flexíveis.
2. DOMINGUES, (1993c), MID, com 23 (vinte e três) tipos de defeitos em pavimentos flexíveis.
3. SHAHIN e KHON (1979) apresentam o PAVER, com 19 (dezenove) tipos de defeitos em pavimentos asfálticos e 19 (dezenove) tipos de defeitos em pavimentos rígidos.
4. SHRP (1993 e 2003) com 15(quinze) tipos de defeitos em pavimentos flexíveis.
5. DNER (1998) mostra 17 (dezessete) tipos de defeitos em pavimentos flexíveis.

Os manuais elencados detalham os tipos de defeitos em pavimentos flexíveis. Os defeitos são descritos indicando-se ainda as causas prováveis, ou seja, os fatos que concorreram para a formação do defeito. A localização também é enfocada para ajudar na distinção com outros defeitos. Para auxiliar na programação das atividades de M&R são analisados os mecanismos de ocorrência que serão úteis no diagnóstico da patologia.

Alguns cuidados tomados durante a construção podem evitar o surgimento de defeitos precoces e melhorar as condições de superfície dos pavimentos. Entre estes, destacam-se problemas relacionados com a compactação, com as características granulométricas do material de base, em função da topografia ou da geometria da via. Devido à largura reduzida da seção de pavimentação, deve-se ter atenção para a compactação junto às extremidades do pavimento. Dessa forma, evita-se o surgimento de deformações longitudinais nas trilhas de roda ou próximo à borda do revestimento. A Figura 2.9 ilustra um afundamento por trilha de roda por deficiência de compactação (CHAVES et al, 2004).

Figura 2.9 Afundamento de trilha de roda por deficiência de compactação (CHAVES et al., 2004)

Bases com granulometria muito grossa devem ser evitadas se o revestimento for de tratamento superficial. Neste caso, pode ocorrer uma concentração de agregados graúdos na superfície do revestimento, como mostrado na Figura 2.10, dificultando o acabamento e provocando alta irregularidade. Principalmente, no caso do Tratamento Superficial Simples (TSS) com brita de diâmetro máximo 3/8", por ser muito delgado vai refletir as imperfeições de acabamento superficial da base, como neste exemplo com base de seixo rolado. Essa ocorrência também contribui para ocasionar desgaste no

revestimento, pois o agregado do TS sobre o seixo é arrancado pelo tráfego com facilidade. O resultado desta ação é a formação de pequenas panelas na base, ilustrada na Figura 2.11 (CHAVES et al., 2004).

Figura 2.10 Revestimento em TSS, aparecendo o seixo rolado da base (CHAVES et al., 2004)

Figura 2.11 Surgimento de pequenas panelas, por evolução do desgaste da figura anterior (CHAVES et al., 2004)

A Figura 2.12 procura sintetizar e inter-relacionar a ocorrência de defeitos devido ao revestimento asfáltico, suas causas, evoluções e serviços de conservação.

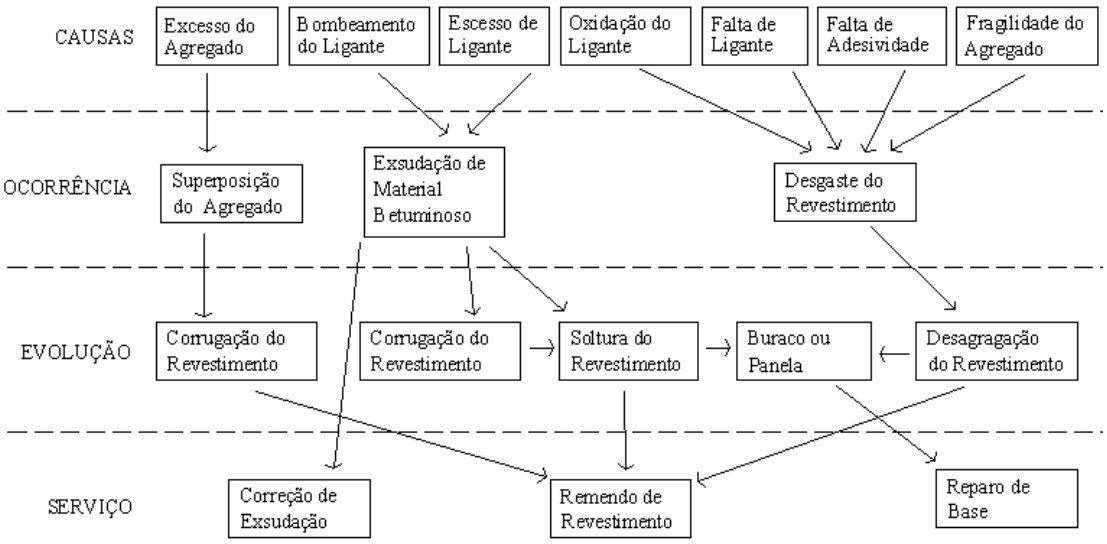


Figura 2.12 Inter-relacionamento entre a ocorrência de defeitos devido ao revestimento, suas causas, evoluções e serviços de conservação

2.2.6 Métodos para avaliação de defeitos

As diferentes manifestações de danos nos pavimentos podem ser avaliadas utilizando-se dois métodos: manuais e automatizados.

Levantamentos manuais

No método de levantamento manual, os segmentos são selecionados por amostragem em intervalos predeterminados utilizando-se procedimentos estatísticos. HAAS et al. (1994) citam que o tamanho da amostra varia de 10 a 25% da extensão da rede, sendo função dos recursos disponíveis e dos tipos de defeitos.

Os levantamentos podem ser realizados a pé ou no interior de um veículo trafegando em velocidades que variam de 6,4 a 16 km/h (HAAS et al., 1994), 3 a 10 km/h (DNER, 1998), 20 a 30 km/h (AUTRET e BROUSSE, 1991, apud MARCON, 1996). Na execução, os dois avaliadores, devidamente treinados, que juntamente com o motorista compõem a equipe, além do veículo e dos equipamentos, descem do veículo e efetuam medidas de abertura de trincas e afundamentos de trilhas de roda.

São examinados também as faixas de tráfego e os acostamentos. As características dos defeitos podem ser registradas em planilhas padronizadas utilizando códigos alfanuméricos ou em planilhas eletrônicas utilizando teclados e computadores portáteis (*laptops* ou *notebooks*).

Levantamentos automatizados

Nos levantamentos automatizados, os veículos são aparelhados com equipamentos especiais dotados de câmeras de vídeo-filmagem e também fotográficas. A velocidade do veículo varia entre 30 km/h e 110 km/h. O estado do pavimento é registrado por meio das câmeras, possibilitando uma posterior análise no escritório a partir do monitor do vídeo. Este levantamento permite que por meio de sensores computadorizados sejam separados e codificados os defeitos quanto aos tipos, severidade e integridade, assim como a integração destas imagens com dados de construção dos pavimentos, tais como: espessura e materiais das camadas, largura, número de faixas e sinalização, além do volume de tráfego.

Os equipamentos podem ser instalados na região frontal ou traseira dos veículos. Permitem que seja realizado um levantamento visual contínuo (LVC) normalizado pelo DNIT (008/2003 PRO).

O LVC que foi utilizado nos levantamentos de campo do SIGMA – Sistema Integrado de Gestão da Manutenção no DERT-CE consiste em um levantamento visual da superfície do pavimento (pista e acostamento), onde um técnico registra o quilômetro de início e de final de cada defeito (ou marco de início mais distância, marco final mais distância) e a severidade observada. O carro trafega com uma velocidade média de 20 km/h. Depois esses números são processados convenientemente e obtém-se uma nota associada a uma escala de qualidade. Este levantamento será mais detalhado no Capítulo 5 desta pesquisa.

BENNETT (1998) ressalta a tendência para o uso de equipamentos automatizados para a coleta de dados dos pavimentos. Cita que os administradores e consultores dispõem de uma grande variação destes tipos de equipamentos, produzidos em diversos países, com diferentes tecnologias, com variabilidade de custos, capacidades e características. Destaca também que os principais problemas que têm sido encontrados pelos usuários referem-se à verificação e a avaliação do desempenho destes instrumentos, bem como na correta identificação dos defeitos.

Dentre os diversos equipamentos existentes para levantamentos automáticos, destacamos:

ARAN – *Automatic Road ANalyser* – equipamento que mede afundamento de trilha de roda, perfil transversal e irregularidade. Os defeitos são registrados por meio de 32 (trinta e dois) sensores ultrasônicos, com precisão de 1 (um) mm, instalados na parte dianteira de um veículo e podem ser monitorados por imagens de vídeo. O avaliador usa 2 (dois) teclados para auxiliar nos levantamentos e podem ser registrados 20 (vinte) tipos de defeitos, três níveis de severidade e cinco níveis de extensão (HAAS, 1994; HAJEK et al., 1998).

ROMDAS – TPL – *ROad Measurement Data Acquisition System* (ROMDAS) – *Transverse Profile Logger* (TPL) – equipamento projetado para registrar o perfil transversal dos pavimentos utilizando sensores ultrasônicos instalados em um veículo. Ele é um componente do sistema ROMDAS que mede também a irregularidade e a

condição visual em vídeo. Cinco sensores com espaçamento de 100 mm estão contidos em uma parte anexa do sistema denominada UMSA (*Ultrasonic Measurement Sistem Array*). A seção principal do TPL contém 20 (vinte) sensores. Na execução dos levantamentos um "super controle" ligado a um computador dispara os sensores e armazena os dados. Entretanto, os desencontros dos disparos podem complicar os respectivos registros dos sensores. Os disparos dos sensores levam um tempo de aproximadamente 0,125s. A distância longitudinal entre os sensores de 1 a 5 de cada grupo varia com a velocidade de operação do veículo (BENNETT, 1998).

Sistema PASCO ROADRECON – equipamento desenvolvido pela PASCO *Corporation* do Japão, foi utilizado nos estudos dos levantamentos de defeitos do programa LTPP/SHRP. O equipamento é instalado em um veículo que pode trafegar com velocidade superior a 80 km/h e fotografar áreas com 4,80 m de largura. As fotografias são tiradas à noite. O sistema é equipado com duas câmeras fotográficas com as seguintes funções: a primeira registra de forma contínua os defeitos de superfície, requerendo interpretação manual das fotos, enquanto que a segunda fotografa, de uma forma ininterrupta, o pavimento, para estimar o afundamento das trilhas de roda, utilizando uma linha ótica como referência (HAAS, 1994).

2.2.7 Índices de defeitos

A avaliação continuada dos defeitos permite gerar uma curva de desempenho do pavimento que possibilita definir o final da vida útil do mesmo, que pode ser bastante diferente da vida de projeto. A vida útil do pavimento, por ser o número real de anos de serviço, pode ser menor ou maior do que a vida de projeto, iniciando a contagem no ano da construção ou da reabilitação. Por sua vez, a vida de projeto é uma estimativa do número de anos de serviço, após a construção ou reabilitação necessários para que seja atingido um valor limite preestabelecido para qualquer índice de defeito do pavimento.

Devem ser estabelecidas escalas para a avaliação dos índices de defeito, atribuindo valores quantitativos, por exemplo, de 0 a 100, e qualitativos a intervalos pré-fixados. É recomendável a utilização da mesma escala para todos os índices, facilitando assim o trabalho dos avaliadores e os respectivos cálculos.

O tipo de defeito deve ser identificado e classificado pelo mecanismo causador. Para a severidade, anota-se a progressão do defeito para determinar o grau de deterioração (baixo, médio ou alto). A densidade é avaliada na extensão relativa de área do pavimento atingida pelo defeito e respectiva severidade.

Estes levantamentos permitem a obtenção de índices de degradação (números calculados de forma sistemática através da atribuição de escala de valores e fatores de ponderação para cada tipo de defeito avaliado). Como exemplos de índices, existe o Índice de Condição do Pavimento (ICP) ou *Pavement Condition Index*, e o Índice de Gravidade Global (IGG).

Os cálculos destes índices diferem em função dos métodos utilizados, porém são de grande utilidade na análise das condições atuais dos pavimentos e também para estabelecer critérios de priorização nos serviços de manutenção e reabilitação (HAAS et al., 1994).

O Índice de Condição do Pavimento (ICP) definido no sistema de gerência PAVER (SHAHIM e KHON, 1979) e também utilizado no processo estocástico de Markov para a previsão de desempenho de pavimentos (WANG et al., 1994 apud BERTOLO e FERNANDES JR., 1997), é calculado pela equação 2.8:

$$ICP = 100 - \sum_{i}\sum_{k} D_y \times f_y \qquad (2.8)$$

onde: D_{ij} - extensão do defeito *i* com o nível de severidade *j*;

f_{ij} - fator de ponderação do defeito *i* com o nível de severidade *j*.

Na Figura 2.13, adaptada de HICKS et al. (1999), é mostrada a seleção de atividades de manutenção e reabilitação em função da variação do Índice de Condição do Pavimento (ICP) ao longo do tempo.

Para a avaliação objetiva das condições de superfície dos pavimentos, o DNER normaliza dois procedimentos: DNIT 006/2003 PRO (antiga DNER - PRO 008/94) e DNIT 007/2003 PRO (antiga DNER-ES 128/83). A aplicação destes dois procedimentos pode ser tanto em programa em nível de rede como para projeto de um segmento específico.

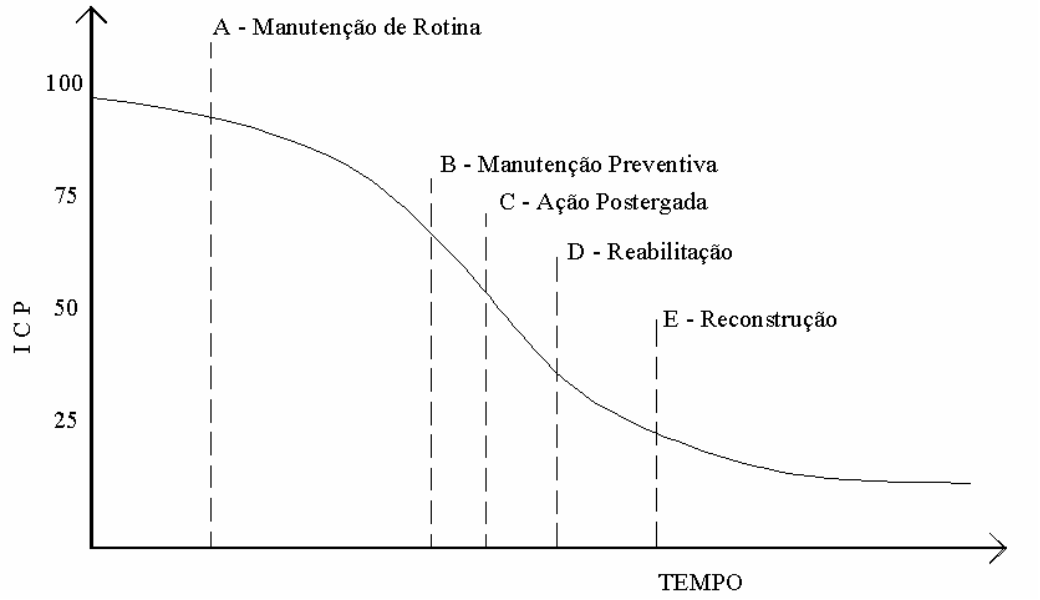


Figura 2.13 Seleção de atividades de manutenção e reabilitação em função da variação do Índice de Condição do Pavimento (ICP) ao longo do tempo (adaptada de HICKS et al., 1999)

O DNIT 006/2003 PRO, fixa as condições exigíveis na avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos e tem como meta estabelecer uma forma de calcular o Índice de Gravidade Global (IGG), utilizando uma combinação de defeitos. O IGG é uma adaptação desenvolvida pelo Engº Armando Martins Pereira do "*Severity Index*", proveniente de estudos experimentais americanos e canadenses, para as condições brasileiras.

O IGG é bastante utilizado em projetos rodoviários pelas empresas de consultoria brasileiras. Entretanto, não é aconselhável que seja empregado em pavimentos com revestimento por penetração, os tratamentos superficiais, por exemplo, devido a não adequação de classificação de falhas mais específicas para estes revestimentos e dos próprios fatores de ponderação. Na Tabela 2.12 (DNIT, 006/2003 – PRO) são apresentados os valores dos fatores de ponderação $\mathbf{f_p}$ para os oito tipos de defeitos.

Tabela 2.12 Fatores de ponderação para defeitos de superfície na norma do IGG (DNIT, 006/2003 – PRO)

Grupo	Símbolo	f_p
1	FI,TTC,TTL,TLC,TLL, TRR (**FC-1**)	0,2
2	J (Couro de jacaré), TB (Trincas em bloco) (**FC-2**)	0,5
3	JE, TBE (**FC-3**)	0,8
4	ALP (Afundamento Plástico Local), ATP (trilha de roda)	0,9
5	O (Corrugação), P (Panela)	1,0
6	EX (Exsudação)	0,5
7	D (Desgaste)	0,3
8	R (Superficial ou Profundo)	0,6

Em função destes fatores é calculado o Índice de Gravidade Individual (IGI), usando a equação 2.9 :

$$IGI = f_r \times f_p \ , \qquad (2.9)$$

onde:

f_r é a freqüência relativa obtida pela razão entre a freqüência absoluta (número de estações com incidência de cada defeito) e o número de estações levantadas.

O IGG é a soma dos IGIs. Na Tabela 2.13 mostram-se as condições do pavimento em função do IGG definindo a correspondência entre conceitos e limites.

Tabela 2.13 Conceitos de degradação do pavimento em função do IGG (DNIT, 006/2003 – PRO)

Conceitos	Limites
Ótimo	$0 < IGG \leq 20$
Bom	$20 < IGG \leq 40$
Regular	$40 < IGG \leq 80$
Ruim	$80 < IGG \leq 160$
Péssimo	$IGG > 160$

Apesar de algumas restrições, por considerar apenas o número de ocorrências e não a extensão dos defeitos, o IGG permite que as condições dos pavimentos sejam

analisadas, assim como em cada segmento homogêneo, seja detalhado o perfil das falhas. O método avalia 15% da área total do pavimento analisado e os levantamentos são feitos a pé.

O procedimento DNIT 007/2003 PRO (antiga DNER-ES 128/83), apesar de ter sua concepção original dirigida para Sistemas de Gerência de Pavimentos, é também usada em projetos de reforço. Os levantamentos são efetuados por caminhamento e por amostragem. O objetivo é possibilitar o cálculo da percentagem de área afetada de cada tipo de defeito de segmentos homogêneos preestabelecidos. Esta metodologia se diferencia da utilizada no procedimento DNIT 006/2003 PRO onde a obtenção da percentagem é em função da freqüência relativa.

2.2.8 Avaliação Estrutural

A avaliação estrutural de um pavimento está relacionada com as características de resistência e de deformabilidade das camadas do pavimento e do subleito em função das forças destrutivas atuantes. A condição estrutural do pavimento é avaliada em função das espessuras das camadas e dos materiais utilizados (MEDINA et al., 1994).

O objetivo da avaliação das condições estruturais é fornecer informações sobre o grau de deterioração do pavimento produzido pelos efeitos das cargas do tráfego e em função dos estudos destas condições, permitir que seja selecionada a alternativa mais adequada de reabilitação. Os procedimentos utilizados nestes levantamentos são os ensaios destrutivos e os não destrutivos.

Nos procedimentos destrutivos são efetuadas extrações “in situ” das amostras deformadas e indeformadas para ensaios de laboratório, objetivando informações das camadas dos pavimentos, tais como: limites de Atterberg, espessuras, tipo de material, capacidade de suporte, módulo de resiliência, teor de umidade, etc. Os ensaios destrutivos apresentam algumas desvantagens, tais como: interrupção do tráfego por um determinado período e introduzir defeito na seção do pavimento (DNER, 1998).

No caso dos não destrutivos, os ensaios para avaliar as condições dos pavimentos, sob a ação das cargas do tráfego, têm a deflexão como resposta. Esta avaliação pode ser feita através do uso de vários equipamentos conhecidos como deflectômetros. Nestes ensaios são avaliadas as respostas das camadas do pavimento e do subleito, a uma carga

aplicada pelo equipamento. A bacia de deflexão gerada permite, através de retroanálise, que sejam estimados os parâmetros de deformação recuperável do subleito e das camadas do pavimento.

A umidade das camadas e do subleito e a temperatura têm influência na determinação das deflexões elásticas (recuperáveis). A elevação da temperatura em pouco mais de duas vezes, pode diminuir o módulo de resiliência do revestimento asfáltico em até nove vezes (MOTTA & MEDINA, 1986). No momento da realização dos ensaios é aconselhável que sejam registradas as temperaturas do pavimento e do ar para os devidos ajustes das deflexões levantadas, para a temperatura padrão, normalmente 21ºC (AASHTO, 1993).

Os efeitos no desempenho estrutural dos pavimentos são avaliados pela informação transmitida através das bacias de deflexões, que é inegavelmente valiosa, para a análise da condição estrutural (HOFFMAN e THOMPSON, 1982). Os mesmos autores ressaltam que, apesar da influência da temperatura no módulo de resiliência, é pouca a contribuição do revestimento asfáltico na deflexão total do pavimento.

Os equipamentos mais utilizados são: estáticos ou quase estáticos (teste de placa, medidor de curvatura e a viga Benkelman automatizada ou não), vibratórios e os deflectômetros de impacto FWD (*Falling Weight Deflectometer*).

Viga Benkelman

Por ser o mais simples, é o equipamento mais utilizado em medidas de deflexões. HAAS et al. (1994) destacam que este equipamento foi desenvolvido na pesquisa experimental da WASHO Road Test. As normas DNER-ME 24/94, DNER-PRO 175/94 e DNER-ME 061/94 regularizam a utilização deste equipamento, constituído de uma viga horizontal apoiada sobre três pés, sendo um traseiro e dois dianteiros, conforme mostra a Figura 2.14. A seguir é apresentada a seqüência da execução do ensaio (DNER-ME 24/94):

1. Aferição da viga => Operação para verificar se uma determinada Viga Benkelman está em condições de ser utilizada e para definir o valor da constante a ser usada para o cálculo das deflexões;

Localização dos pontos => Os pontos do pavimento em que devem ser medidas as deflexões são convenientemente marcados e estão localizados a distâncias prefixadas da borda do revestimento, de acordo com a Tabela 2.14 a seguir:

Tabela 2.14 Pontos dos pavimentos para medidas das deflexões

Largura da faixa de tráfego (m)	Distância da borda do revestimento (m)
2,70	0,45
3,00	0,60
3,30	0,75
3,50 ou mais	0,90

3. Posicionamento do caminhão => Um dos conjuntos de rodas duplas traseiras do caminhão deve ser centrado sobre o ponto selecionado na trilha externa, conforme tabela anterior;

4. Posicionamento da Viga Benkelman => A ponta de prova da Viga Benkelman deve ser colocada entre os pneus da roda dupla, coincidindo com o ponto selecionado; A Figura 2.15 mostra o posicionamento da viga;

5. Leitura inicial/Leitura final

Leitura Inicial => Deve-se ligar o vibrador e fazer a leitura inicial (L0) quando o extensômetro indicar movimento igual ou menor que 0,01 mm/min, ou decorridos 3 minutos da ligação do vibrador;

Leitura Final => Essa leitura segue a mesma metodologia da inicial, sendo que o caminhão deve se deslocar, lentamente, 10 m para frente;

6. Transporte da viga => Para transportar a viga deve-se desligar o vibrador e a parte móvel da viga deve ser travada;

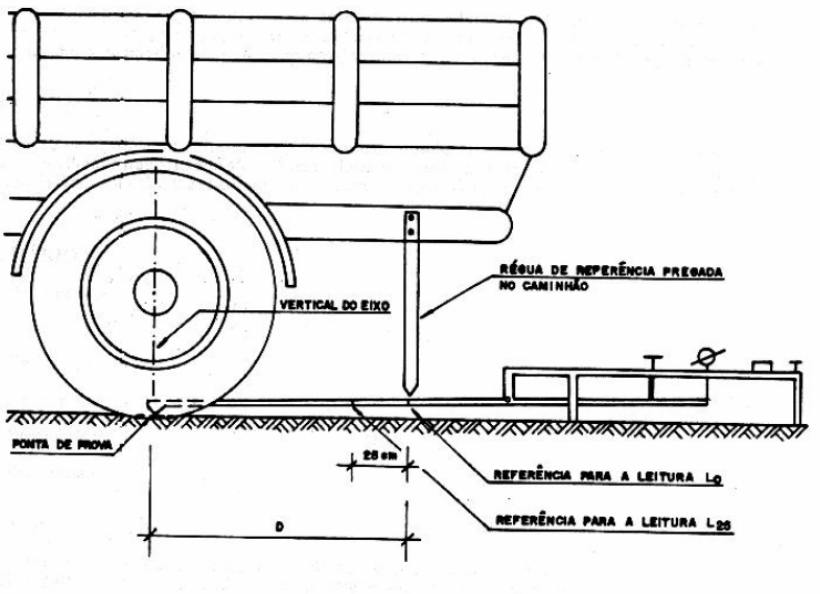


Figura 2.14 Posicionamento da Viga Benkelman (DNER ME 024/94)

7. Cálculo das deflexões => Deflexão do pavimento no ponto de prova, equação 2.10:

$$D_0 = (L_0 - L_f) \times \frac{a}{b} \tag{2.10}$$

onde:

D_o – Deflexão real ou verdadeira, em centésimo de milímetro;

Lo – Leitura inicial, em centésimo de milímetro;

Lf – Leitura final, em centésimo de milímetro

a e b – Parte maior e menor do braço de prova, respectivamente.

8. Raio de curvatura => Para determinar o raio de curvatura da bacia de deformação, faz-se uma leitura adicional, para isso desloca-se o eixo do caminhão 25 cm à frente;

Raio de curvatura da bacia de deformação no ponto de prova, equação 2.11:

$$R = \frac{6250}{2 \times (D_0 - D_{25})} \tag{2.11}$$

onde:

R – Raio de curvatura, em metro;

D_o – Deflexão real ou verdadeira, em centésimo de milímetro;

D_{25} – Deflexão a 25 cm do ponto de prova, em centésimo de milímetro.

Viga Benkelman Automatizada

Este equipamento foi desenvolvido para aumentar a velocidade de medidas das deflexões, utilizando os mesmos princípios da viga Benkelman. Funciona instalada sob um veículo carregado e à medida que este se desloca, os dispositivos registram automaticamente as deflexões, a partir do ponto inicial do ensaio. As velocidades de operação variam, em função dos tipos de equipamentos, de 0,8 km/h no "*California Traveling Deflectometer*", a 3 km/h no deflectógrafo La Croix e 18 km/h no Curvímetro no CEBTP (HAAS et al., 1994; DNER, 1998). MEDINA et al., (1994) destacam a utilização no laboratório de Engenharia Civil (LNEC) de Lisboa, da retroanálise a partir da deformada medida com a viga Benkelman automatizada.

Entre os modelos atuais utilizados no Brasil citamos o Deflectógrafo Digital para Pavimentos (viga eletrônica) que substitui com vantagens as vigas tradicionais, por possibilitar a tomada das medidas da bacia deflectográfica em uma única passagem com o caminhão. Trabalha em conjunto com um *notebook* e um hodômetro eletrônico, garantindo agilidade na leitura e armazenamento dos resultados de forma confiável.

FWD – *Falling Weight Deflectometer*

Este equipamento, de concepção mais avançada, permite a coleta de dados deflectométricos com mais acurácia e rapidez (MOTTA et al., 1995). Na execução dos ensaios, são utilizados pesos variados que caem de alturas controladas sobre uma placa com amortecedores apoiada na superfície do pavimento e esta, por sua vez, transmite forças de impulso à estrutura. As deflexões, que são as respostas do pavimento aos impactos, são registradas por um conjunto de sensores, posicionados longitudinalmente a partir do centro de aplicação das cargas. Um microcomputador é instalado em um veículo de apoio e comanda automaticamente a operação. O FWD, se não tivesse um alto custo de aquisição, seria o equipamento mais recomendado para levantamentos deflectométricos (WITCZAK, 1989; CARDOSO, 1992; MEDINA, et al., 1994; HAAS et al., 1994).

Várias pesquisas correlacionando as deflexões elásticas medidas com o FWD e com a viga Benkelman foram realizadas, dentre elas citam-se: MOTTA et al. (1995); DUARTE et al. (1996). Porém, é ressaltado que não existe uma relação única entre os dois levantamentos, sendo função dos tipos de estruturas dos pavimentos, entre outros aspectos. Dentre as vantagens citadas por diversos autores da utilização do equipamento FWD na medida das deflexões, podem ser citadas as seguintes:

- A possibilidade de avaliar a não-linearidade no comportamento tensão-deformação das camadas do pavimento;
- Medir e registrar automaticamente a distância entre os pontos de ensaio, assim como as temperaturas do ar e da superfície do pavimento.

Na Figura 2.15 ilustra-se o resultado do ensaio com o deflectômetro de impacto (FWD): bacia de deflexão e índices de curvatura do revestimento (ICR) e da base (ICB).

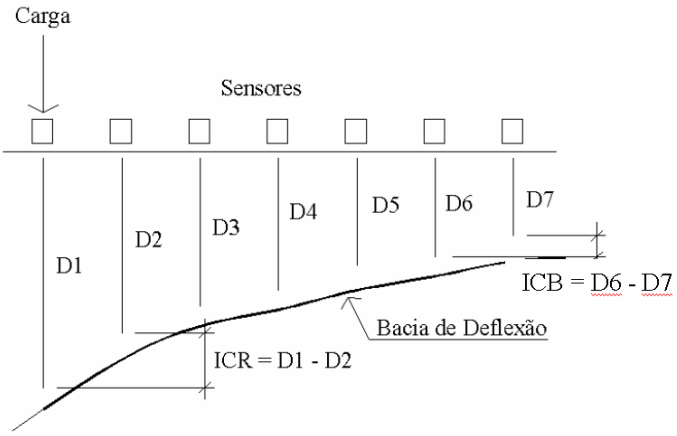


Figura 2.15 Ensaio com o deflectômetro de impacto (FWD)

Métodos de Reforço de Pavimentos

Os métodos de reforço de pavimentos mais utilizados e representativos são relacionados em DNER (1998), por tipo de enfoque, da seguinte forma:

(a) Enfoque Empírico – Análise Deflectométrica

• DNER-PRO 10/79 – Modelo A e DNER-PRO 11/79 – Modelo B;

(b) Enfoque Empírico – Análise da Deficiência Estrutural e Funcional

• DNER-PRO 159/85;

• Método da AASHTO;

• (c) Enfoque Mecanístico-empírico

• DNER-PRO 269/94 – Método da resiliência (Tecnapav).

DNER-PRO 10/79 e DNER-PRO 11/79

O DNER normalizou, em 1979, dois métodos de reforço baseados em critérios deflectométricos para avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis: PRO 10/79 – Método A e PRO 11/79 – Método B. Eles são derivados de métodos empíricos, concebidos no exterior e adequados às nossas condições. No método A, os critérios adotados conduzem quase sempre a valores conservadores, refletindo-se, porém, nos custos iniciais de construção. Fundamenta-se na relação entre a grandeza das deflexões recuperáveis e o desempenho dos pavimentos asfálticos. O método considera que a evolução das deflexões recuperáveis ao longo da vida de um pavimento pode se dar nas fases de consolidação devido à ação do tráfego que ocasiona decréscimo na deflexão elástica, na fase elástica em que a deflexão permanece constante, e na fase de fadiga, que se caracteriza por um acelerado crescimento no valor da deflexão e a perda de capacidade estrutural das camadas do pavimento.

O método B pode conduzir a resultados que indicam espessuras de reforço inferiores àquelas que são obtidas no método A. Baseia-se na deflexão máxima admissível (D_{adm}) nos pavimentos asfálticos, não depende das características da estrutura do pavimento e sim, unicamente, do tráfego que o solicita. A equação 2.12 para determinação de D_{adm} corresponde a deflexões associadas à carga padrão de 8,2 tf por eixo:

$$\log D_{adm} = 3{,}01 - 0{,}176 \log N \qquad (2.12)$$

DNER-PRO 159/85

O método é originado das equações de previsão de desempenho, desenvolvidas na Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários - PICR, que teve como objetivo produzir um modelo de otimização de investimentos em infra-estrutura rodoviária (PINTO, 1993). O procedimento 159/85 considera um dos principais conceitos de Gerência de Pavimentos, qual seja, analisar as várias alternativas de reforço para um pavimento, mediante um estudo funcional de cada uma das alternativas, e seus correspondentes custos de construção e manutenção ao longo da vida útil estabelecida. Os fatores de equivalência da AASHTO/GEIPOT são usados para calcular o número N (número de repetições do eixo simples padrão de 8,2 tf). As espessuras

assim determinadas quase sempre são inferiores àquelas obtidas pelo método A e, às vezes, próximas às calculadas pelo método B.

Método da AASHTO

Os procedimentos do método da AASHTO, até 1983, são empíricos e se baseiam na relação desempenho-serventia desenvolvida na pista experimental da AASHTO, considerando o conceito de vida remanescente de um pavimento. A equação básica de projeto, 2.13, fornece a relação entre a necessidade estrutural de um pavimento e o número de repetições de um eixo de 8,2 tf que um pavimento pode suportar para atingir a serventia terminal de projeto, da seguinte forma:

$$NE = a_1D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (2.13)$$

onde:

NE – Número estrutural que representa a resistência necessária (relativo à espessura) da estrutura total do pavimento;

a_i – Coeficiente estrutural da i-ésima camada, que representa a qualidade do material do revestimento, base e sub-base;

D_i – Espessura em polegadas da i-ésima camada, (revestimento, base e sub-base);

m_2, m_3 – Coeficientes que representam as características de drenagem da base e sub-base, respectivamente.

Quando o NE, calculado através da expressão 2.13 for superior ao NE necessário, o projeto é considerado satisfatório. O NE necessário é função da capacidade de suporte do subleito, do tráfego, fatores ambientais e serventias iniciais e finais calculadas para o pavimento. O NE requerido pelo reforço é igual à diferença entre o NE de um novo pavimento projetado para as novas condições ambientais, tráfego, subleito e perda de serventia e o NE efetivo do pavimento existente.

Pode também ser calculado o número estrutural corrigido (NEC), que considera a influência do subleito no comportamento do pavimento (QUEIROZ, 1981; DNER, 1985; PATERSON, 1987). É destacado por estes autores que o cálculo do NEC passou a ser utilizado a partir da pesquisa PICR desenvolvida com o Banco Mundial. Existem

duas expressões, 2.14 e 2.15, equivalentes para o cálculo do número estrutural corrigido:

1. QUEIROZ, 1981 e DNER, 1985:

$$NEC = \sum_{i=1}^{n} a_i D_i + 3{,}51 \log CBR - 0{,}85 (\log CBR)^2 - 1{,}43 \qquad (2.14)$$

2. PATERSON, 1987

$$NEC = 0{,}0394 \sum_{i=1}^{n} a_i D_i + 3{,}51 \log CBR - 0{,}85 (\log CBR)^2 - 1{,}43 \qquad (2.15)$$

onde:

a_i e D_i , já foram definidos anteriormente. Observa-se, entretanto, que a dimensão de D_i é em centímetros para a primeira equação, 2.14 e em milímetros para a segunda, 2.15.

CBR = valor do Índice de Suporte Califórnia (ISC) do subleito determinado em laboratório na umidade ótima para a primeira expressão e "in situ" para a segunda expressão.

PATERSON (1987) desenvolveu uma correlação entre o número estrutural corrigido, NEC, e a deflexão máxima do pavimento medida com a viga Benkelman, D_{VB}, efetuando análise estatística dos dados da PICR. Para pavimentos flexíveis com base granular, foi estabelecida a equação 2.16:

$$NEC = 3{,}2 \times D_{VB}^{-0{,}63} \qquad (2.16)$$

O Manual do HDM 4 – Volume 4 de modelos de deterioração admite que a deflexão com o FWD quando a carga aplicada é de 700 kPa pode ser usada a mesma equação 2.16 da Viga Benkelman para o cálculo do NEC.

DNER-PRO 269/94 – Método da Resiliência (Tecnapav)

O método é resultante do estudo realizado por Ernesto Preussler e Salomão Pinto, apoiado nos resultados da pesquisa sobre Avaliação Estrutural de Pavimentos, empreendida pelo IPR/DNER e firmas de Consultoria. Utiliza o programa TECNAPAV (Tecnologia Nacional para Restauração de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários), que determina a espessura necessária de camada de reforço em concreto asfáltico a ser aplicada, de modo que a vida de serviço do pavimento restaurado seja aquela correspondente a certo nível de trincamento a ser atingido no pavimento rodoviário, ou

a vida de fadiga das camadas asfálticas, no caso de pavimentos aeroportuários (RODRIGUES, 1987).

O procedimento tem como fundamento os modelos de fadiga de misturas betuminosas, o comportamento resiliente típico de solos finos e materiais granulares e o cálculo de tensões e deformações considerando a teoria da elasticidade não-linear. Como nos outros métodos, a rodovia é dividida em segmentos homogêneos, considerando-se as condições de tráfego, do subleito, da deflexão recuperável, da estrutura do pavimento e das condições superficiais. O número N é calculado em função dos fatores de equivalência do *United States Army Corps of Engineers,* USACE, diferindo do PRO 159/85 que utiliza os da AASHTO/GEIPOT.

O método permite o dimensionamento do reforço com mistura nova e com mistura reciclada. A deflexão máxima admissível na superfície (D_{adm}) em 0,01 mm é calculada por meio da expressão 2.17:

$$\log D_{adm} = 3{,}148 - 0{,}188 \log Np, \qquad (2.17)$$

sendo Np o número N de projeto.

O método é resultante da tese de doutorado desenvolvida na COPPE/UFRJ (PREUSSLER, 1983), que utilizou o mesmo programa computacional (FEPAVE), também usado no trabalho de BENEVIDES (2000).

2.3 Irregularidade Longitudinal

2.3.1 Generalidades

As irregularidades longitudinais, conforme citado na literatura por diversos autores, é, atualmente, o parâmetro mais utilizado internacionalmente para a avaliação funcional de pavimentos. Elas são decorrentes de problemas de construção ou de defeitos oriundos da ação do tráfego e do clima, principalmente das deformações permanentes do revestimento e do subleito.

As especificações da "*American Society for Testing and Materials*" - ASTM E-867-82A de 1982, conforme PATERSON, (1987), definem as irregularidades longitudinais como sendo "*os desvios da superfície de um pavimento em relação a uma superfície plana,*

com características e dimensões que afetam a dinâmica dos veículos, a qualidade do rolamento, o carregamento dinâmico e a drenagem".

Vários fatores causam o aumento da irregularidade com o tempo, dentre eles, a ação do tráfego, o meio ambiente (temperatura, água) e a qualidade da construção. Os movimentos e esforços indesejáveis gerados nos veículos pela irregularidade longitudinal levam a uma condição de rolamento desconfortável, insegura e antieconômica.

HAAS et al. (1994) citam que a dinâmica dos veículos é afetada pelas distorções na superfície, e que estas causam desgaste, acréscimos no tempo de viagem e na manutenção. Portanto, as distorções que originam as irregularidades têm grande influência no custo de operação dos veículos, provocando também neles, os deslocamentos verticais e laterais, originados das respectivas acelerações. O principal desconforto dos usuários, apontado pelos mesmos autores, é decorrente dos deslocamentos verticais originados das distorções longitudinais do perfil do pavimento. Por sua vez, os deslocamentos laterais, responsáveis pelas maiores ações das cargas dinâmicas dos veículos, resultantes de movimentos do veículo para direita e para a esquerda em torno de seu eixo longitudinal, são originados das diferenças das declividades transversais do pavimento e pelas curvas horizontais. Destaca-se ainda a importância da velocidade do veículo no grau de percepção da irregularidade do pavimento pelo usuário.

Apesar desta ampla gama de definições, a prática hoje é limitar as medidas das irregularidades, relacionando-as com o perfil longitudinal da superfície da rodovia por serem estas que causam vibrações nos veículos e desconforto aos usuários. As irregularidades nas rodovias podem ser causadas por quaisquer dos seguintes fatores (KSAIBATI et al., 1998):

- Técnicas de construção que permitem algumas variações do perfil do projeto.
- Cargas repetidas, particularmente em áreas canalizadas.
- Compactação inicial não uniforme da base ou do subleito.

Nas últimas três décadas, vários estudos apontaram a irregularidade longitudinal como sendo o parâmetro que mais causava desconforto aos usuários. Mas desde os estudos da

AASHO, CAREY e IRICK (1960) mostraram a grande influência que tem a irregularidade longitudinal, na opinião dos motoristas, sobre a qualidade de serventia da superfície dos pavimentos. Entre os anos 1971 e 1982, o Banco Mundial realizou várias pesquisas no Brasil, no Quênia, no Caribe e na Índia. Estes estudos tinham como principal proposta investigar a relação entre a irregularidade longitudinal nas rodovias e os custos dos usuários.

No Brasil foi realizada entre 1977 e 1982, a Pesquisa de Inter-relacionamento dos Custos Rodoviários, PICR, cujo objetivo foi recolher conhecimentos detalhados sobre a composição dos custos totais do transporte rodoviário, em função dos custos de construção, de manutenção e de utilização das rodovias. Naquela pesquisa, foram desenvolvidos modelos de previsão da irregularidade dos pavimentos, que serão citados mais adiante, no item 2.4. Estes modelos advêm da importância de prever a evolução das irregularidades dos pavimentos, associadas aos vários padrões alternativos de construção e conservação, permitindo que os custos dos usuários possam ser avaliados em relação a cada alternativa. Fazendo referência a outros trabalhos foram apontadas por KSAIBATI et al. (1998) alguns efeitos associados com a irregularidade: sensação de desconforto ao usuário pela má qualidade de rolamento, menor segurança, ruídos e desgastes dos pneus.

FARIAS & SOUSA (2002) citam um estudo sobre levantamento e definição de irregularidade para a Europa realizada pela *World Road Federation* (PIARC) em 1997/98 e os estudos avançados que estão sendo realizados nos Estados Unidos, Canadá e diversos outros países dentro do Programa SHRP . Destacam ainda, as reuniões anuais entre grupos de estudos do programa C-SHRP, do Canadá, e da Associação de Transportes do Canadá (*Transportation Association of Canada*, TAC), especialmente para este tema.

Dada a sua importância na percepção de conforto dos usuários, vários países adotam índices de serventia baseados exclusivamente em medições de irregularidade. A irregularidade longitudinal é, quase sempre, utilizada como fator decisivo na estimativa da vida útil do pavimento. HAAS & HUDSON (1978) destacam que a irregularidade longitudinal não só é uma função do perfil do pavimento, como também é das características do veículo, incluindo pneus, suspensão, etc., assim como dependem da sensibilidade dos usuários quanto às variações de velocidades e de acelerações.

Estudos mostram que 95% das informações relativas à serventia de pavimentos nos testes originais da AASHO estão ligadas exclusivamente à irregularidade do perfil (HASS et al., 1994). A importância da irregularidade tem sido também reconhecida como forma de controle de construção em pavimentos novos. Devido à difusão dos sistemas de gerência de pavimentos ocorrida na última década, tem sido crescente a conscientização nos órgãos públicos da real necessidade de medir as irregularidades longitudinais. Entretanto, verifica-se que há, em vários países, uma grande variação tanto na forma de medir, como nos critérios de aceitação (FARIAS e SOUSA, 2002).

Uma pesquisa conduzida no LTPP (NCHRP, 2002c), pela *Soil and Materials Engineers*, terminada em agosto de 2001, trouxe conclusões preliminares acerca dos fatores que afetam a irregularidade do pavimento em diferentes tipos de estruturas, tanto de pavimentos novos, como de reabilitados. A análise desenvolvida na referida pesquisa utilizou a base de dados do Sistema de Informação em Gerenciamento do LTPP/IMS, (*Long Term Pavement Performance/Information Management System*) classificada como "Nível E" para os Estudos Específicos em Pavimentos (SPS) e os Estudos Gerais em Pavimentos (GPS). Para atingir o objetivo do projeto, a base de dados LTPP/IMS foi revista no início de 2000. Dados relacionados com estrutura e características do pavimento, técnicas de reabilitação, condições climáticas, níveis de tráfego, propriedades e materiais das camadas, variáveis de fadiga do pavimento e outros fatores que podem influir na irregularidade do pavimento foram extraídos das tabelas de dados LTPP e compilados numa base específica do projeto para facilitar a análise. O *International Roughness Index* (IRI) foi adotado como medida da irregularidade do pavimento. A irregularidade de cada seção do pavimento foi caracterizada pelo valor médio do IRI para a seção (ex. o valor médio do IRI calculado para as trilhas de roda direita e esquerda).

Na pesquisa citada, os dados disponíveis para os quatro experimentos SPS seguintes foram analisados para determinar os fatores que afetam a regularidade do pavimento e sua contribuição:

- SPS-1, Estudo Estratégico de Fatores Estruturais para Pavimentos Flexíveis,

- SPS-2, Estudo Estratégico de Fatores Estruturais para Pavimentos Rígidos,
- SPS-5, Reabilitação de Pavimentos de Concreto Asfáltico,
- SPS-6, Reabilitação de Pavimentos de Concreto de Cimento Portland.

Estudo realizado pela NAPA, *National Asphalt Pavement Association,* C-SHRP e UNIVERSITY of WATERLOO, examinou a evolução da irregularidade dos pavimentos com o tempo. Em medidas de irregularidade realizadas no Arizona, Estados Unidos, em pavimentos novos e após oito e dez anos de serviços, esta pesquisa concluiu que os pavimentos construídos com menor irregularidade inicial apresentaram menor irregularidade ao longo do tempo, menor nível de trincamento e, conseqüentemente, irão requerer menores custos com manutenção. As diferenças encontradas na pesquisa da NAPA entre as irregularidades aumentaram, resultando em 110% entre as medidas iniciais realizadas após a construção do pavimento e após 8 a 10 anos de serviço. O estudo destaca ainda que o modelo HDM III estima que as diferenças entre as irregularidades iniciais sejam de cerca de 113% deste valor após oito anos de serviço do pavimento, valor próximo dos 110% medidos.

2.3.2 Perfis

Os perfis bidimensionais de uma rodovia, longitudinais e transversais, são representados tendo como ponto de partida uma linha imaginária. Na Figura 2.16, adaptada de SAYERS e KARAMIHAS (1998), mostram-se esquematicamente os respectivos perfis.

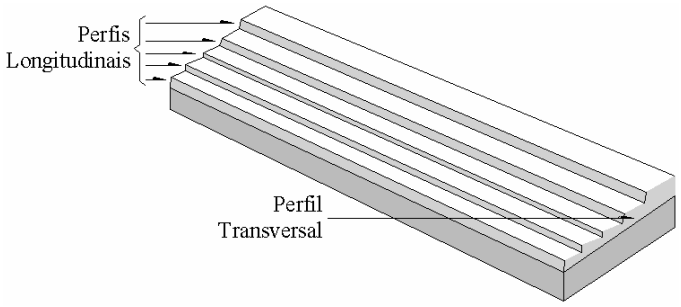


Figura 2.16 Perfis longitudinais e transversais (adaptada de SAYERS e KARAMIHAS, 1998)

No Perfil Transversal de um pavimento são verificadas a condição de drenagem superficial da pista e as deformações superficiais plásticas. Estas deformações são originadas da ação do tráfego e se formam normalmente nas trilhas de roda. Elas representam sérios riscos à segurança por facilitar a perda do contato pneu/pavimento, quando o pavimento está molhado, pois em tais deformações pode haver acúmulo de água na pista (SAYERS e KARAMIHAS, 1998).

Os Perfis longitudinais, cujas medidas podem ser efetuadas a partir de qualquer linha imaginária paralela ao eixo da pista, contêm o greide de projeto da rodovia, as irregularidades longitudinais e ainda a textura do pavimento, dependendo da forma e para qual finalidade ele é medido. A condição do pavimento está diretamente relacionada com os dados obtidos na medida deste perfil (SAYERS e KARAMIHAS, 1998; BARELLA et al., 2004).

Na verdade, só existe um perfil verdadeiro em cada linha imaginária que se escolha. O mesmo perfil longitudinal somente será obtido se a mesma linha imaginária for rigorosamente seguida, o que é de difícil obtenção na prática. Por isso, pode-se afirmar a quase impossibilidade de ser medido o perfil verdadeiro, pois ele depende da precisão dos equipamentos disponíveis para medí-lo, tanto no deslocamento horizontal, quanto na medida vertical (SAYERS e KARAMIHAS, 1998; FARIAS e SOUSA, 2002).

Variações no perfil longitudinal, relacionadas com o greide, geralmente se apresentam como ondulações com grande amplitude e comprimento de onda. Ressalte-se que, entre os principais parâmetros influentes na quantificação estatística da irregularidade longitudinal, estão a amplitude de onda e a aceleração vertical média quadrática. OLIVEIRA [1](2002 apud CAMPOS, 2004), destaca que a irregularidade pode ser dividida em categorias, de acordo com a amplitude (A_1) e o comprimento de onda (λ):

Ondas curtas, possuem	$0{,}50\ m \leq \lambda \leq 5\ m$	e	$1\ mm \leq A_1 \leq 20\ mm$
Ondas médias, possuem	$5\ m \leq \lambda \leq 15\ m$	e	$5\ mm \leq A_1 \leq 50\ mm$
Ondas longas, possuem	$15\ m \leq \lambda \leq 50\ m$	e	$10\ mm \leq A_1 \leq 200\ mm$

[1] OLIVEIRA, M.E.D., (2002), *Estudo Comparativo entre Medições de Irregularidades de Pavimentos realizadas no Brasil e nos Estados Unidos.*Tese M.Sc. São Paulo

As ondas com dimensões superiores aos intervalos anteriormente descritos não são consideradas como irregularidade longitudinal, e as ondas com dimensões inferiores são consideradas somente na avaliação de microtextura, macrotextura e megatextura. A Figura 2.17, adaptada de YODER e WITCZAK (1975), caracteriza as ondulações (distúrbios) longitudinais e transversais.

SAYERS & GILLESPIE, [2](1983, apud FARIAS e SOUSA, 2002), relacionam os comprimentos de ondas, grande médio e curto, com as velocidades alta e baixa. A Figura 2.18 mostra de forma esquemática as respostas do veículo às diferentes irregularidades de comprimento de onda.

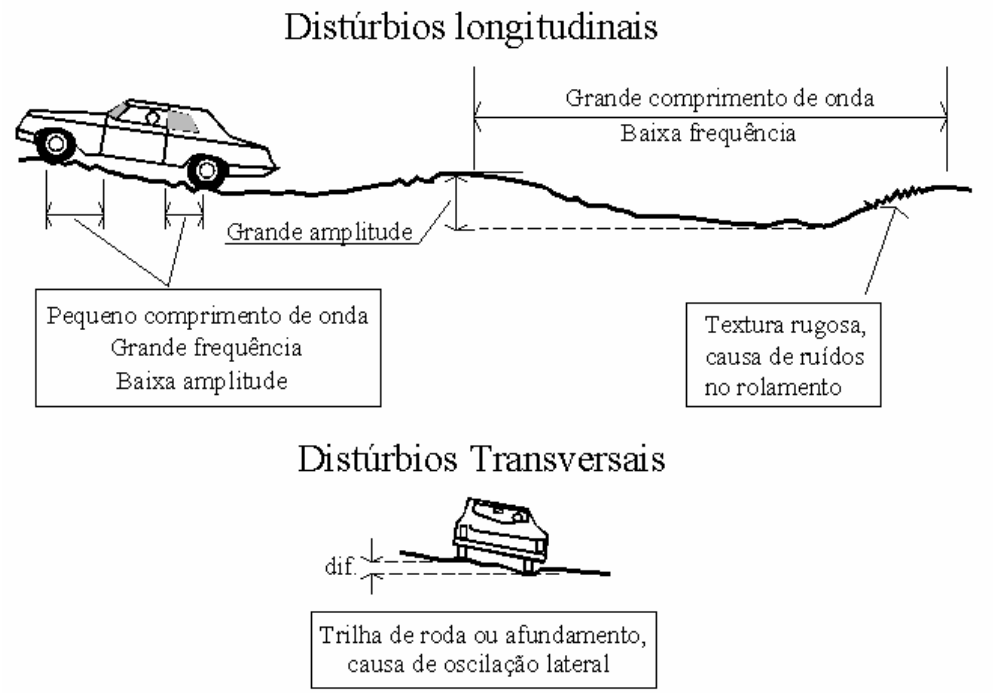


Figura 2.17 Ondulação Longitudinal e Transversal (adaptada de YODER e WITCZAK, 1975)

[2] SAYERS, M. e GILLESPIE, T.D., 1983, "Guidelines for the Conduct and Calibration of Roads Roughness Measurement". UMTRI-83-30. Suplementary Report to the World Bank.

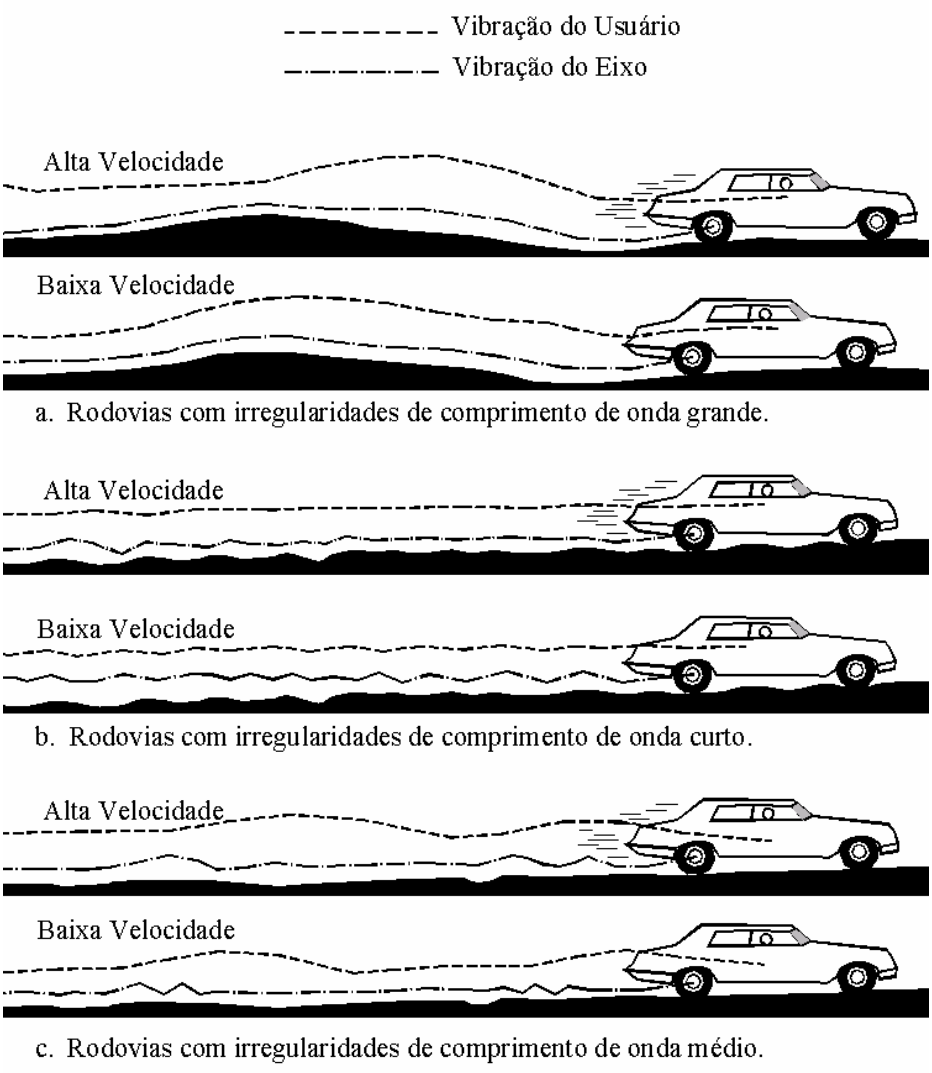

Vibração do Usuário
Vibração do Eixo
Alta Velocidade
Baixa Velocidade
a. Rodovias com irregularidades de comprimento de onda grande.
Alta Velocidade
Baixa Velocidade
b. Rodovias com irregularidades de comprimento de onda curto.
Alta Velocidade
Baixa Velocidade
c. Rodovias com irregularidades de comprimento de onda médio.

Figura 2.18 Respostas do veículo às diferentes irregularidades de comprimento de onda em altas e baixas velocidades (modificada de SAYERS e GILLESPIE, 1983, apud FARIAS e SOUSA, 2002)

2.3.3 Equipamentos de medição das irregularidades

Devido à importância de mensurar as irregularidades longitudinais dos pavimentos, diversos equipamentos podem ser utilizados para esta finalidade. Os equipamentos medidores de irregularidades diferem uns dos outros quanto às características, a produtividade e à eficiência do levantamento. A irregularidade pode ser avaliada por medidores de perfil, tais como: régua, régua deslizante, perfilômetro a laser ou através de medidores tipo resposta – SMITR, mecânicos ou baseado em acelerômetro.

Os estudos para desenvolvimento de equipamentos para medição das irregularidades longitudinais dos pavimentos foram iniciados antes de 1900, com um aparelho denominado *Viagraph,* mencionados em um livro por Thomas Aitken. Este equipamento, inventado por um engenheiro irlandês, era composto por uma viga horizontal de 365 cm de comprimento e 22,9 cm de largura. Ele era puxado continuamente sobre a superfície da rodovia, registrando o perfil da mesma, e a soma das irregularidades era dada por um índice numérico (HVEEM 1960[3], apud SOUZA et al., 2001).

Na literatura, vários autores citam os diversos equipamentos ou processos que são utilizados para a medição de parâmetros ligados às irregularidades, dentre eles, DNER (1998); MARCON (1996); SAYERS & KARAMIHAS (1998); FARIAS e SOUSA (2002); HAAS et al. (1994). Estes procedimentos podem ser agrupados em quatro sistemas:

a) Sistemas de medidas diretas do perfil – em que as medidas diretas ou manuais da geometria vertical do pavimento são obtidas com o emprego de instrumentos topográficos ou instrumentos adequados. Os indicativos da irregularidade são verificados em função dos dados processados estatisticamente, como por exemplo:

    - Método estático nível e mira, mostrado na Figura 2.19, utilizado para calibração de sistemas medidores de irregularidades, podendo também este procedimento ser usado na medição periódica de trechos experimentais. O nível fornece a elevação de referência, linha de visada horizontal. A leitura na mira determina o plano vertical, oferece a altura da superfície em relação ao nível de referência, e uma trena ou outro instrumento mede a distância longitudinal (DNER, 1986; SAYERS e KARAMIHAS, 1998; FARIAS e SOUSA, 2002).

[3] HVEEM, F.N., 1960, "Devices for Recording and Evaluating Pavement Roughness". Highway Research Boarding. Bulletin 264.

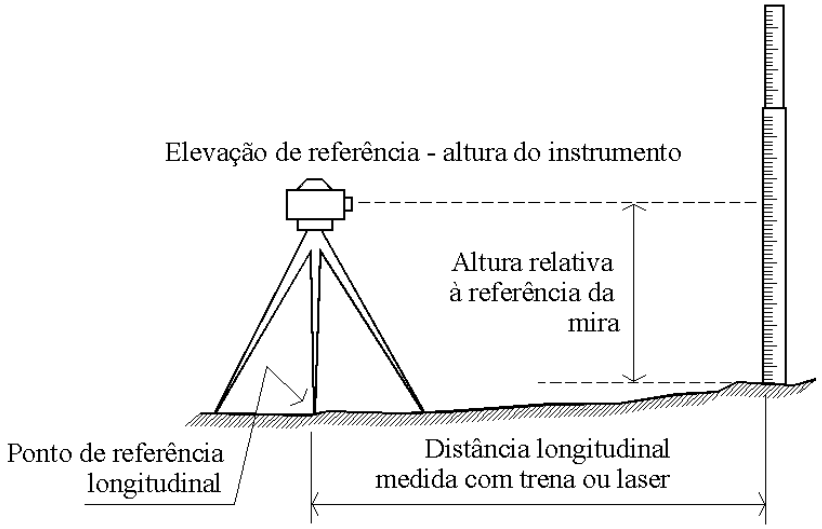


Figura 2.19 Método estático nível e mira (adaptada de SAYERS e KARAMIHAS, 1998)

- Método estático Dipstick – consiste de uma base com dois suportes (pés) afastados de 30 cm, um inclinômetro e um computador interno alimentado por bateria. As medidas são feitas em seqüência, girando manualmente a armação em torno do pé dianteiro, em relação ao sentido da avaliação, fazendo-se um giro de 180^{o}. Os registros são efetuados por um microcomputador anexado ao aparelho. O nível de referência, que deve ser atualizado a cada movimento, é horizontal e dado pela posição de um dos pés de suporte. A distância horizontal e o desnível são calculados pelo computador com base na distância entre os suportes e o ângulo fornecido pelo inclinômetro. A sua pequena produtividade, máxima de 270 m/h, limita a sua aplicação a pequenos trechos. Pode também ser usado para calibração de sistemas medidores de irregularidades, com uma produção maior que a do método de nível e mira (BERTRAND et al., 1991[4], apud MARCON, 1996; FARIAS & SOUSA, 2002). Na Figura 2.20 modificada de SAYERS & KARAMIHAS (1998), é mostrado o esquema de um Dipstick, enquanto que a Figura 2.21 ilustra um Dipstick, em operação.

[4] BERTRAND, C., HARRISON, R. e HUDSON, W.R., 1991, "Evaluation of a High-Resolution Profiling Instrument for Use in Road Roughness Calibration". In: *Fifth international Conference on Low-Volume Roads*, Transportation Research Record 1291,Washington, DC, v.2 pp 93-105.

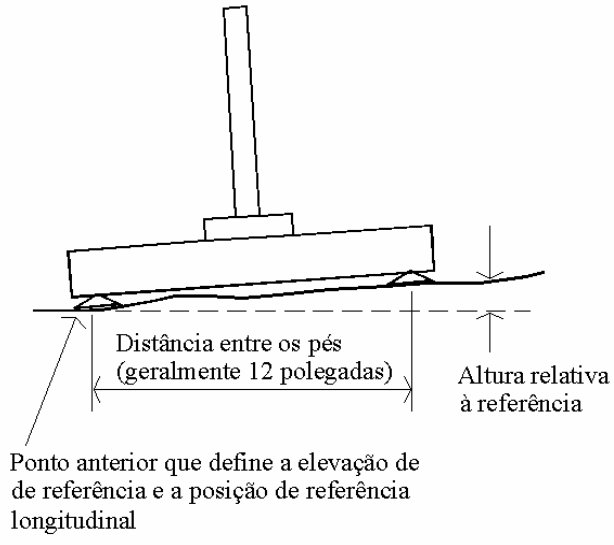


Figura 2.20 Esquema de um Dipstick, (modificada de SAYERS & KARAMIHAS, 1998)

Figura 2.21 Ilustração de um Dipstick em operação (KARAMIHAS, 2004)

b) Sistemas de medidas indiretas do perfil – onde as medidas mecanizadas fornecem valores como coeficiente de irregularidade, amplitude e comprimento de onda. Alguns mais conhecidos são descritos a seguir:

- Perfilômetro dinâmico de superfície – GMR, ou simulador de quarto de carro. É do tipo inercial, simula os movimentos de uma roda guia e de potenciômetros eletrônicos para medir a distância entre a superfície do pavimento e o chassi do veículo. Mais detalhe deste tipo de equipamento, simulador, será apresentado mais adiante.

- Perfilômetro CHLOE – desenvolvido pelos engenheiros da AASHO Road Test como um clone simplificado do Perfilômetro da AASHO, por ser este último considerado complexo. O CHLOE, mostrado na Figura 2.22, registra o ângulo θ, em intervalos de 30,5 cm (*1 foot = 1 pé*), nas seções dos pavimentos, enquanto está sendo rebocado com uma velocidade de 8 km/h, sendo θ, o ângulo entre a linha que liga o centro de suporte das rodas do perfilômetro e o veículo, e a linha que conecta o centro de duas pequenas rodas do perfilômetro. Devido a variação do ângulo θ raramente exceder 3º, o seu valor é registrado em radianos. É um equipamento de boa repetibilidade, entretanto, não tem capacidade de medir comprimentos de onda maior do que 3,66 m (12 ft).

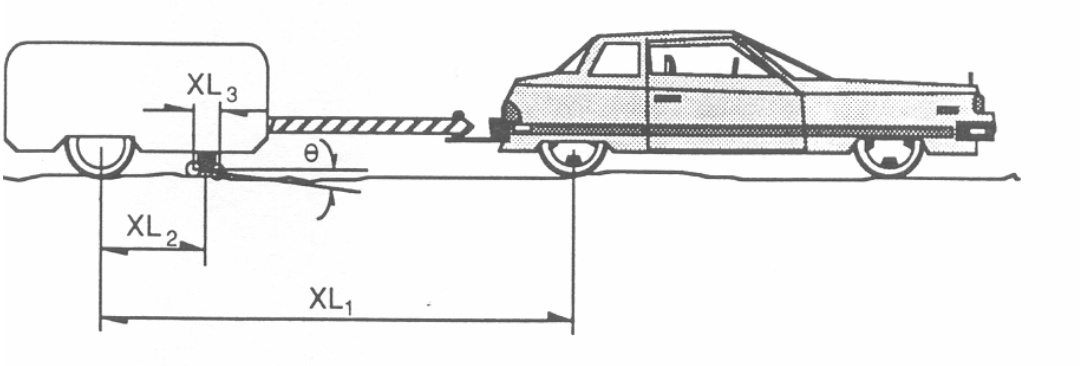


Figura 2.22 Esquema do Perfilômetro CHLOE utilizado no AASHO Road Test, (adaptada de HAAS et al., 1994)

- MERLIN, ***M****achine for* ***E****valuating* ***R****oughness using* ***L****ow-cost* ***IN****strumentation,* do TRRL, *Transport and Road Research Laboratory*, desenvolvido na Inglaterra, é um equipamento que, apesar de ser de baixo custo, pode ser considerado uma alternativa de alto desempenho, entre os equipamentos mais sofisticados e os métodos altimétricos de medição de irregularidade de pavimentos, de forma direta conforme MARCON (1996), ou indireta, de acordo com DNER (1998). Trata-se de um instrumento formado por três pontos de apoio, sendo dois fixos externos distanciados de 180 cm e o terceiro, um ponto médio, móvel, além de uma roda e de um pé. O terceiro ponto, movimenta um braço mecânico, que se desloca sobre uma folha de papel quadriculada de 5 x 5 mm, onde são registrados os deslocamentos, reproduzindo assim o desnível entre os dois apoios do equipamento. O aparelho é conduzido manualmente pelo

operador ao longo de um determinado alinhamento, e os registros são efetuados em intervalos regulares. Aplicável, tanto como instrumento para calibração de equipamentos mais sofisticados e mais rápidos, quanto para a medição da condição de conforto (MARCON, 1996; CASSANIGA e MACHADO FILHO, 2002). O MERLIN está ilustrado na Figura 2.23.

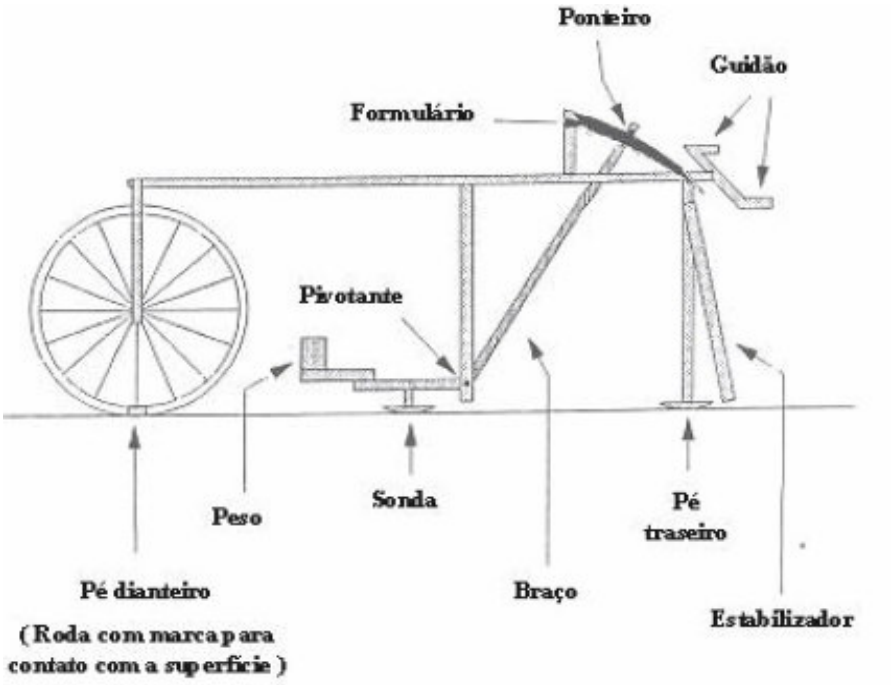


Figura 2.23 Componentes básicos do MERLIN (CASSANIGA & MACHADO FILHO, 2002)

- Analisador de perfil longitudinal – APL, desenvolvido pelo *Laboratoire Central des Ponts de Chaussés* – LCPC, caracteriza os defeitos do nivelamento longitudinal pela amplitude e comprimento das ondas do pavimento. O aparelho é constituído de uma roda simples, puxada por um veículo com um pêndulo horizontal usado para estabelecer o plano de referência. O ângulo θ, indicado na Figura 2.24, entre a estrutura e o pêndulo, é medido e convertido para uma distância vertical que é registrada em intervalos especificados (HAAS et al., 1994; MARCON, 1996).

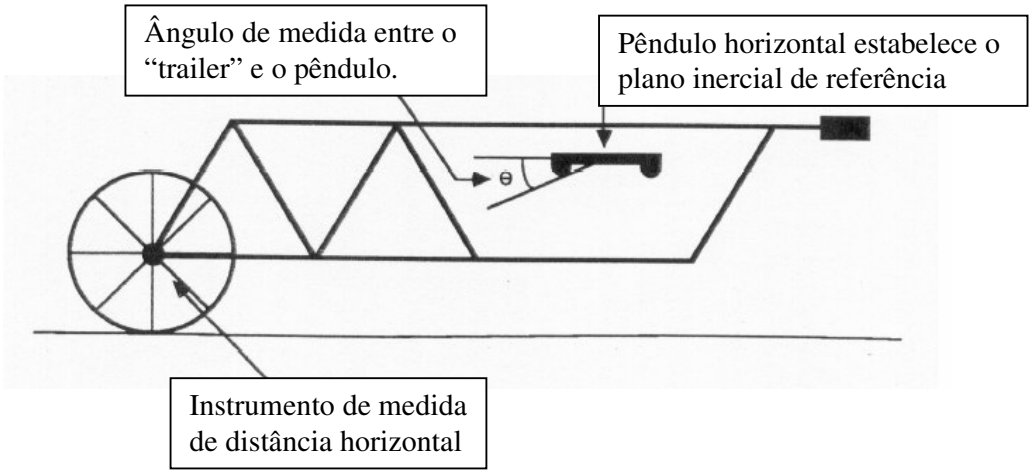

Ângulo de medida entre o "trailer" e o pêndulo.
Pêndulo horizontal estabelece o plano inercial de referência
θ
Instrumento de medida de distância horizontal

Figura 2.24 Esquema do perfilômetro APL (modificada de HAAS et al., 1994)

c) Sistemas baseados na reação do veículo – são conhecidos como medidor tipo resposta (SMITR). Nestes sistemas, as reações dos veículos às irregularidades são medidas acumulativamente pelos movimentos entre a carroceria e seus eixos traseiros e dianteiros, ou seja, é a resposta à excitação dinâmica provocada pelo perfil. Os mais citados são:

- Rugosímetro BPR - *Bureau of Public Road*, Consiste de um reboque, que se desloca com uma velocidade de 15 a 20 km/h, com uma única roda teste de um pneu liso, sem frisos, com molas e amortecedores, simulando um quarto de carro, para registrar qualquer irregularidade do pavimento. Um integrador mecânico acoplado a um contador elétrico registra os deslocamentos, cujo valor acumulado, em uma certa distância determina o Índice de Rugosidade. Um fio ligado ao eixo por um contato especial e em volta de uma mola em tambor, mede as deflexões entre o eixo da roda e a armação. Foi um dos primeiros SMITR a operar (SAYERS et al., 1986; HAAS et al., 1994; MARCON, 1996; MEDINA, 1997).

- Sistema integrador IPR/USP, desenvolvido, inicialmente, pelo Núcleo de Desenvolvimento Tecnológico de Transportes - NDTT / USP, em convênio com o IPR/DNER, com financiamento do Banco Mundial, em várias fases. Na primeira, em 1982, foi desenvolvido o sensor de deslocamentos compatível com a parte eletrônica do equipamento Maysmeter. Na segunda, 1983/84, foi desenvolvido o quantificador de irregularidades de pavimentos rodoviários

(QIPR). É o aparelho tipo resposta mais utilizado no Brasil. Diversas modificações foram realizadas desde então no equipamento, buscando melhorar seu desempenho, resultando no equipamento de medição hoje utilizado, tanto na sua versão embarcada, Integrador SED, quanto na versão tracionada, Mirr. O Integrador, Figura 2.25, é montado em veículo de passeio médio, constituindo um SMITR. Quando esse veículo se desloca sobre a via, o Integrador fornece o somatório dos valores absolutos dos deslocamentos verticais de um ponto do diferencial, em relação à carroceria do veículo. O procedimento DNER-PRO 182/87 (DNER, 1987), normaliza a utilização do equipamento Integrador IPR/USP.

Figura 2.25 Parte de um SMITR conhecido como Integrador IPR/USP (DOMINGUES, 2003)

- Bump Integrator, BI, desenvolvido pelo TRRL, na Inglaterra - este aparelho mede o deslocamento relativo entre a carroceria do veículo que o transporta e seu eixo traseiro, sendo instalado entre o eixo e o corpo do veículo e produz contagens que são proporcionais ao movimento da suspensão. Um impulso ou contagem/km é gerado cada vez que os deslocamentos acumulam 2,54 cm ou 1", podendo também ser 5,08 cm ou 2", considerando as duas direções, como foi na pesquisa de Experimento Internacional de Irregularidade. A velocidade de operação é de 32 km/h (SAYERS et al., 1986; MARCON, 1996).
- Mays Ride Meter ou Maysmeter consiste de uma haste anexada ao eixo e a um transmissor, ambos instalados em um veículo de passeio. Foi desenvolvido nos anos 1960 para o *Texas Highway Department*. Os deslocamentos relativos entre

o eixo traseiro do veículo são medidos pelo transmissor e o sinal é enviado a um registrador. Os movimentos relativos verticais são acumulados, em valor absoluto, ao longo de uma distância predeterminada. A Figura 2.26 mostra o esquema do equipamento que inicialmente era montado em automóveis. Com a evolução, para diminuir o número de calibrações que se fazem necessárias para manter a sua eficiência, o equipamento é hoje em dia instalado em reboques padronizados de duas rodas, podendo operar com velocidades de 80 km/h. Este aparelho foi, assim como o rugosímetro, utilizado no Experimento Internacional de Irregularidade de Rodovias, sendo também usado na obtenção de dados de QI na Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários PICR (SAYERS et al., 1986; HAAS et al., 1994; MARCON, 1996).

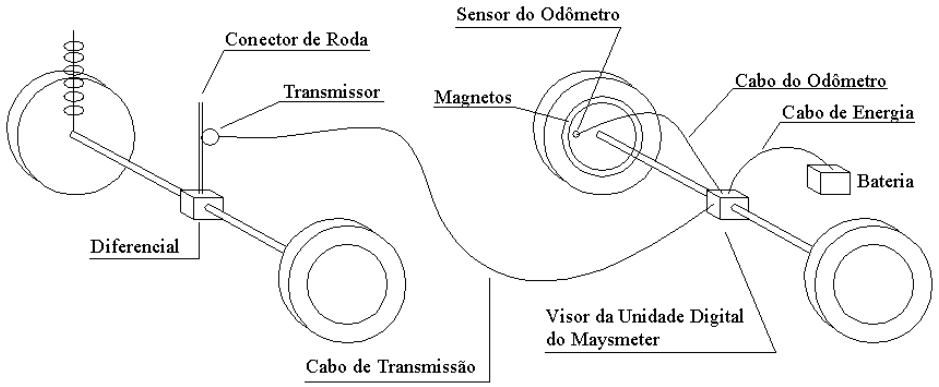


Figura 2.26 Esquema do equipamento do tipo resposta, Maysmeter

d) Sistema de medida com equipamentos com sensores sem contato dos tipos ótico, ultra-sônico ou a laser: baseiam-se na reflexão de uma onda sonora ou raio laser emitido por dispositivos situados no veículo. Estes aparelhos digitais coletam dados do perfil em pontos discretos que servem de entrada para um programa de computador que calcula as elevações, distâncias e índices de irregularidade. Como exemplo destes equipamentos, tem-se:

- Perfilômetro Laser do TRRL, *Transport and Road Research Laboratory of England*, é do tipo não inercial, desenvolvido nos anos 1970, sendo equipado com quatro medidores a laser, adaptados em seqüência. Na Figura 2.27 são mostrados os quatro lasers que são utilizados, na medida em que são deslocados ao longo da rodovia, para medir as distâncias para a superfície do pavimento. O

processamento dos dados permite o cálculo do perfil do pavimento. Uma vantagem deste equipamento é operar a velocidades variáveis acima do normal, mesmo naquelas correspondentes às auto-estradas (HAAS et al., 1994).

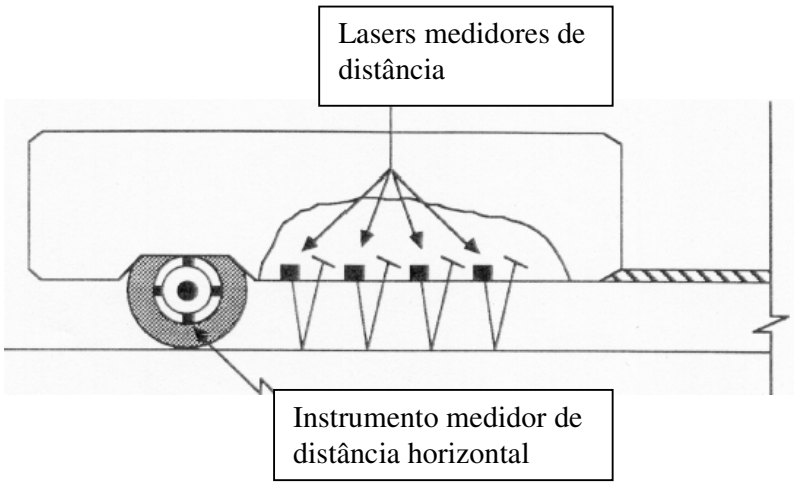


Figura 2.27 Esquema do Perfilômetro do TRRL (adaptado de HAAS et al.,1994)

- ARAN – *Automatic Road ANalyser,* já citado neste trabalho. Este equipamento, analisador automático da superfície do pavimento, mede afundamento de trilha de roda, perfil transversal e irregularidade.
- DYNATEST MARK II RSP - *ROAD SURFACE PROFILER* – desenvolvido pela Dynatest este equipamento automatizado é capaz de medir continuamente e em altas velocidades os perfis longitudinais, IRI e o "número de rolamento", *Ride number,* RN, perfil transversal, afundamento de trilha de roda, macrotextura e curvatura. Além disso, o equipamento permite uma fácil integração com o Sistema de Informações Geográficas – SIG. A medida do perfil longitudinal tem como base o método Dakota do Sul. Um acelerômetro é usado para a obtenção do movimento vertical da massa do veículo e um laser mede a distância entre esta massa e o pavimento. O cálculo do IRI segue as especificações do Banco Mundial. As medidas dos perfis são determinadas sumarizando os resultados destes movimentos. O RSP está disponível em várias versões, desde aquela com apenas um laser até a versão topo de linha com vinte e um sensores. Para a determinação do IRI, RN, perfis transversais e afundamentos de trilha de roda, são necessários um mínimo de três *lasers*. O

sensor inercial, IMS, pode ser adicionado para medir as características geométricas.

- Laser Road Surface Test (RST) – desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa de Rodovias e Tráfego da Suécia. Além das irregularidades medidas por meio de um acelerômetro instalado no chassi de um veículo que trafega com uma velocidade máxima de 88 km/h o equipamento mede afundamento de trilha de roda, perfis longitudinais e transversais, macrotextura e distâncias percorridas.
- Perfilômetro a laser da Cibermétrica – desenvolvido pela Cibermétrica/Solotest, Brasil. Equipamento que será utilizado no presente estudo, será enfocado nos Capítulos 4 e 5.

Vários órgãos rodoviários, Departamentos de Transportes de diversos países, estão constantemente renovando e aperfeiçoando a utilização dos perfilômetros para as medidas das irregularidades. Na pesquisa de KARAMIHAS (2004) foram efetuados testes em doze seções, sendo cinco na Virgínia, quatro na Pensilvânia e três em Michigan. Foram utilizados sessenta e oito perfilômetros, sendo trinta e cinco de alta velocidade, dezenove de médio porte e quatorze de velocidade de caminhamento, inclusive um equipamento de nível e mira automatizado. Os objetivos desta pesquisa foram:

- Determinar a repetibilidade e reprodutibilidade das medidas com os perfilômetros;
- Estabelecer critérios para selecionar os locais de verificação dos perfilômetros;
- Verificar a interação dos vários tipos de perfilômetros com a textura dos pavimentos;
- Avaliar os métodos de análise usados na verificação dos perfilômetros.

KSAIBATI et al. (1998) concluíram que a localização do sensor afeta os resultados do IRI. Os sensores localizados no lado direito tendem a ter resultados de IRI maiores do que os localizados no lado esquerdo, ou seja, à medida que o IRI vai aumentando, se torna maior a diferença de valores entre as trilhas, preponderando os maiores valores na trilha externa. Naquela pesquisa, realizada utilizando sensores ultrasônicos e a laser, a assertiva acima também se verifica em ambos os sensores.

Há equipamentos com sensores usando laser e outros com sensores por ultra-som. A diferença entre estes dois perfilômetros é apenas nos sensores de distância do carro ao chão. Os sensores de ultra-som trabalham enviando uma onda sonora até o chão e cronometrando seu tempo para voltar, apresentando assim algumas desvantagens que os tornam pouco precisos, tais como a velocidade do som no ar (aproximadamente 340m/s) variar com a temperatura, a pressão e a umidade e o vento também pode interferir (SAYERS E KARAMIHAS, 1998).

Outra desvantagem é que o ponto medido no chão é bem maior. O som saindo do sensor não é direcional como um laser. Na verdade ele forma um cone. A desvantagem final é que como a velocidade é de 340m/s no ar, o tempo de ida e volta limita a freqüência de aquisição dos dados.

2.3.4 Escalas de medição das irregularidades longitudinais

A irregularidade pode ser medida em diversas escalas padronizadas, dependentes do tipo de equipamento utilizado para a avaliação das condições da superfície do pavimento. Como resultado de uma pesquisa internacional de medição de irregularidade, de iniciativa do Banco Mundial, realizada em Brasília no ano de 1982 (GEIPOT, apud Queiroz, 1984; SAYERS et al., 1986b), foi estabelecida a escala *International Roughness Index*, IRI, que é uma escala de referência transferível para todos os sistemas de medição.

O IRI pode ser definido como um índice estatístico que sumariza as variações do perfil longitudinal do pavimento nas trilhas de roda. É determinado processando-se as medidas de um modelo algorítmico (por exemplo, o modelo de quarto-de-carro), que simula a forma com que os veículos respondem às irregularidades dos pavimentos. O modelo de simulação de quarto de carro, apresentado na Figura 2.28, é um sistema composto por uma massa de chassi (suspensa), uma mola de suspensão, um amortecedor e uma roda, que tem comportamento reológico de uma mola e os respectivos parâmetros.

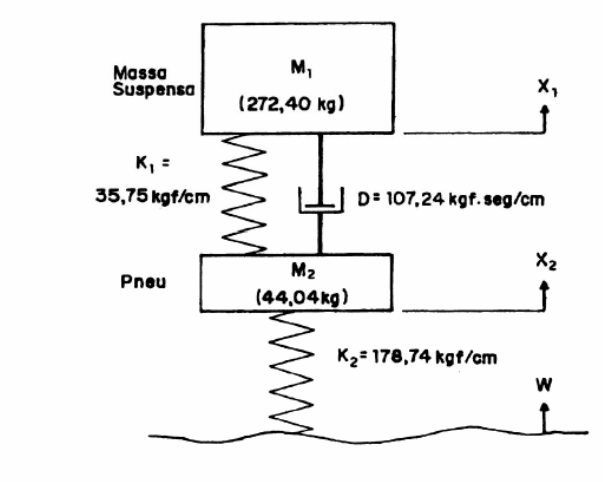


Figura 2.28 Modelo de quarto de carro (QUEIROZ, 1984, adaptada de MEDINA, 1997)

O IRI é calculado por integração da diferença das velocidades entre a massa amortecida e a massa não amortecida. O resultado obtido é o somatório da diferença de elevação entre a carroceria e o eixo do veículo, como resposta ao perfil longitudinal da rodovia (SAYERS, 1995). A Equação 2.18 representa a fórmula matemática utilizada para o cálculo.

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{X/V} \left| Z_S - Z_U \right| dt \qquad (2.18)$$

onde:

IRI – Índice Internacional de Irregularidade (mm/m ou m/km);

L – Comprimento da seção (m);

X – Distância longitudinal (m);

V – Velocidade de avanço (m/s);

Z_S – Velocidade da massa amortecida (m/s);

Z_U – Velocidade da massa não amortecida (m/s).

HAAS et al, (1994), além do modelo acima, recomendam os seguintes sumários estatísticos:

1. **Aceleração vertical média quadrática, AV, "*Root Mean Square of Vertical Acceleration*, RMSVA,** definida como a diferença média quadrática entre inclinações adjacentes do perfil longitudinal. Neste modelo, a relação entre a variação das ordenadas e o intervalo da amostragem, define cada inclinação. QUEIROZ (1984), conceitua a AV, como sendo uma variável definida sobre as cotas de superfície de pavimentos para sintetizar as ações de irregularidade medidas por equipamentos apropriados".
2. **Variância da declinação longitudinal (SV),** variância das declinações observadas nas trilhas de roda. Esta medida da irregularidade longitudinal do pavimento foi utilizada na AASHO Road Test, buscando correlacioná-la com o *Present Serviciability Index*, PSI, (AASHO, 1962) ou Índice de Serventia Atual, ISA ou PSR.

A escala padrão de irregularidade adotada no Brasil é o 'Quociente de Irregularidade'- QI – *Quarter-car Index*, expresso em contagens/km, desenvolvido por QUEIROZ (1981), calculado a partir do nivelamento topográfico de um trecho com nível e mira, obtendo-se cotas com espaçamento de 0,5 m de cada trilha de roda. Nestes estudos foram relacionados os dados do nivelamento em um sumário estatístico, permitindo a determinação da aceleração vertical média quadrática, AV. Em seguida foi obtida a equação 2.19 que relaciona o QI com a AV:

$$QI = - 8{,}54 + 6{,}17AV_{1,0} + 19{,}38AV_{2,5} \qquad (2.19)$$

onde:

QI – quociente de irregularidade, em contagens/km;

$AV_{1,0}$ – aceleração vertical quadrática com comprimento de base (b) igual a 1,0m;

$AV_{2,5}$ – aceleração vertical quadrática com comprimento de base (b) igual a 2,5.

O Índice de Serventia Atual, ISA ou *Present Serviciability Index*, PSI, foi desenvolvido durante os ensaios das pistas experimentais da AASHO. Este índice surgiu a partir de correlações estatísticas entre alguns parâmetros definidores da condição do pavimento e a Avaliação da Serventia Atual (PSR), determinada subjetivamente por um painel de avaliadores. Em síntese, o PSI, definido na Equação 2.20, relaciona a variância das declividades (SV), o afundamento de trilha de roda (RD) e as áreas trincada e

remendada (C+P) com a avaliação subjetiva obtida por meio do índice PSR (AASHO, 1962).

$$PSI = 5{,}03 - 1{,}91\ LOG\ (1 + SV) - 1{,}38\ RD^2 - 0{,}01\ (C + P)^{1/2} \quad (2.20)$$

onde:

PSI – Índice de Serventia Atual (*Present Serviciability Index*);

SV – Variância das declividades (*Slope Variance*) (x 10^{-6});

RD – Profundidade ou afundamento de trilha de roda (polegadas);

C – Área trincada (pé²/1000 pé²);

P – Área remendada (pé²/1000 pé²).

O índice PSI pode variar de zero a cinco, sendo muito próximo a cinco para pavimentos recém-construídos. Quando o valor do PSI atinge o conceito regular ou PSI = 2,5, normalmente adotado para pavimentos de alto volume de tráfego, significa que o pavimento atingiu o estado mínimo admissível de funcionalidade, necessitando de imediata restauração (PINTO e PREUSLER, 2001).

Na prática, os valores de QI e IRI são altamente correlacionados. SAYERS, et al.,(1986), estabeleceram a relação: IRI = QI/13, para IRI em m/km e QI em contagens/km, que ainda é utilizada no país. Os mesmos autores consideram os seguintes valores típicos de IRI:

$1{,}5 \leq IRI \leq 2{,}5$ m/km: pavimentos em excelente condição;

IRI > 12 m/km: pavimentos em péssimas condições.

Com relação ao QI, PATERSON (1987), assim considera a condição do pavimento:

$15 < QI < 30$: excelente;

$30 \leq QI < 45$: boa;

$45 \leq QI < 60$: regular;

$60 \leq QI < 75$: má;

ARCHONDO-CALLAO (1999) na escala de irregularidade longitudinal de pavimentos, considera o IRI igual a zero para uma superfície perfeitamente plana, IRI igual a dois

para rodovias pavimentadas em boas condições, IRI igual a seis para rodovias pavimentadas com razoável irregularidade, IRI igual a 12 para rodovias pavimentadas extremamente irregulares e IRI em torno de 20 para vias não pavimentadas extremamente irregulares.

O IRI por ser um parâmetro internacional pode ser entendido em qualquer país. Um valor três para o IRI, representa o mesmo grau de irregularidade, seja no Brasil, nos Estados Unidos ou no Paquistão. Porém, cada país estabelece o seu limite de aceitabilidade para o valor do IRI, considerando além das condições específicas, o grau de importância atribuído pelos usuários à irregularidade quando das avaliações dos pavimentos. Há uma sensível diferença de tolerância em relação à adoção do limite de aceitabilidade na verificação para diferentes classes de rodovias e também para decisão de intervenções reparadoras no controle numa rodovia recém-construída ou restaurada, em um sistema de gerenciamento em nível de rede (FARIAS e SOUSA, 2002).

Na Tabela 2.15 são apresentadas as faixas de classificação dos pavimentos quanto à irregularidade longitudinal, em IRI, em função da qualidade do rolamento proporcionado por estas vias, para diversos países, adaptada de FARIAS e SOUZA (2002).

Tabela 2.15 Faixas de classificação de irregularidade longitudinal, para diversos países com base no IRI (adaptada de FARIAS e SOUZA, 2002)

EUA		Brasil		Espanha		Chile		Uruguai		Honduras	
Muito Bom	0-0,95	Excelente	1,0-1,9	Excelente	0-1,5			Muito Bom	0-3,2		
Bom	0,95-1,5	Bom	1,9-2,7	Aceitável	1,5-2,5	Bom	0-3,0	Bom	3,2-3,9	Bom	0-3,0
Regular	1,5-2,7	Regular	2,7-3,5	Regular	2,5-4,0	Regular	3,0-4,0	Regular	4,0-4,6	Regular	3,5-6,0
Ruim	>2,7	Ruim	3,5-4,6	Não desejável	>4,0	Ruim	>4,0	Ruim	>4,6	Ruim	>6,0
		Péssimo	>4,6								
Fonte: AASHTO (1999)		Fonte: Pinto & Preussler (2001)		Fonte: Rio (1977)		Fonte: Patiño & Anguas (1998b)					

Verifica-se a variabilidade na adoção de limites de aceitabilidade de um país para outro. Estes limites foram estabelecidos para rodovias de primeira classe. O IRI, apesar de ser um índice aberto, sem limite superior, para manter um efeito de escala para comparação, o seu valor foi limitado para um valor máximo de 10 (dez), sendo apresentados de

forma gráfica por FARIAS e SOUZA, (2002), na Figura 2.29. Para fins de uniformização a irregularidade foi dividida em quatro classes: excelente (incluindo muito bom), bom, regular e ruim (incluindo péssimo). A faixa considerada regular para os EUA contém uma subdivisão: razoável com IRI entre 1,5 e 1,9 e sofrível com IRI entre 1,9 e 2,7. Em alguns países, como Chile e Honduras, só há três classes: bom, regular e ruim.

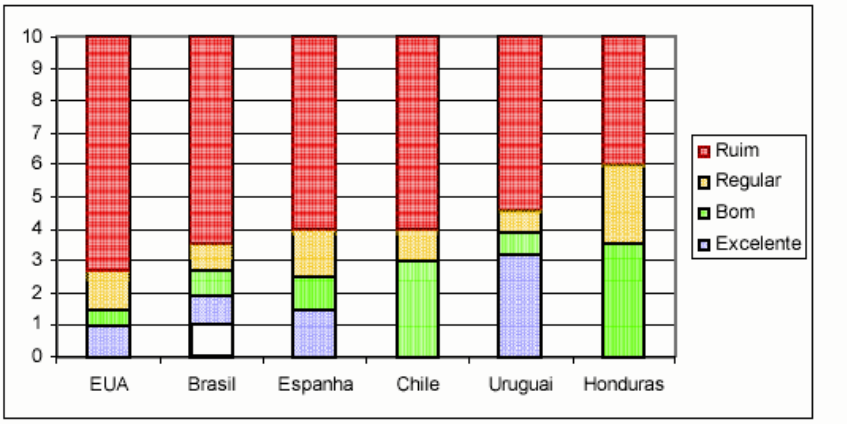


Figura 2.29 Escala de limites da variação da irregularidade em vários países (FARIAS & SOUZA, 2002)

Na Tabela 2.16 (DNER, 1998) é apresentada a classificação de rodovias pavimentadas em função da irregularidade longitudinal medida pelo QI ou pelo IRI.

Tabela 2.16 Condição de rodovias pavimentadas em função do IRI (DNER, 1998)

Condição	IRI (m/km)	QI (cont/km)
Boa	1,0 – 3,5	13 – 45
Regular	3,5 – 4,5	45 – 59
Ruim	> 4,5	> 60

O IRI também é correlacionado com índices obtidos em outros equipamentos, utilizados ao redor do mundo. Toma-se, por exemplo, os seguintes casos apresentados por WATANATADA et al. (1987), conforme mostrado na Tabela 2.17.

Tabela 2.17 Correlação entre IRI e outros índices (WATANATADA et al., 1987).

Equipamento	Índice Típico	País	Correlação
Bump Integrator	BI	Inglaterra	$IRI = BI^{0,89}$ (IRI<17)
APL72	W_{SW}	França	$IRI = 0,78(W_{sw})^{0,63}$ (IRI<9)

2.3.5 Calibração dos equipamentos

A calibração de equipamentos medidores de irregularidade é feita por correlação entre os valores do indicador estatístico adotado de cada uma das seções de calibração e as respectivas leituras do aparelho tipo resposta adotado. No procedimento adotado no Brasil (DNER, PRO 164/94) a correlação é estabelecida através de uma das seguintes equações, 2.21 e 2.22:

$$QI = a + bL \quad (2.21)$$

$$QI = a + bL + cL^2 \quad (2.22)$$

onde

a, b, c - parâmetros determinados pelo método dos mínimos quadrados;

L - leitura representativa (característica) de cada seção de calibração;

A equação de ajustamento é considerada aceitável quando o coeficiente de determinação (R^2) for maior ou igual a 0,8.

DOMINGUES e BOTTURA (1998) constataram que os modelos ajustados para trechos em tangente e em nível, não computam adequadamente o QI para trechos de geometria variável, e afirmam que "*em regiões ou porções de malhas rodoviárias onde as geometrias horizontal e vertical sejam caracterizadamente variáveis, devem ser testados modelos de regressão para obtenção do QI através das leituras L dos SMIRTR que incluam as variáveis rampa (r), aceleração radial* (v^2/R) *e o quadrado da aceleração radial* ($v^2/R)^2$".

Além disso, os autores citados propõem o desenvolvimento de novas curvas de calibração com preestabelecimento de faixas de irregularidade longitudinal, por

exemplo, média/baixa (QI de zero a 58,5) e alta/média (QI maior que 58,5). Apontam ainda que as equações utilizadas para calibração dos sistemas medidores de irregularidade longitudinal constantes das normas do DNER, tendem a distorcer as faixas mais baixas de medidas de irregularidade.

2.4 Modelos de previsão de desempenho

2.4.1 Serventia e desempenho

O desempenho pode ser definido como a habilidade de um pavimento servir satisfatoriamente ao tráfego ao longo de um período de tempo e a serventia como a habilidade de um pavimento servir ao tráfego para o qual foi projetado, medida numa certa data (MOTTA, 1991). Os modelos de desempenho se tornaram os elementos-chave em um Sistema de Gerência de Pavimentos (ROHDE et al., 1998). As condições funcional e estrutural dos pavimentos são avaliadas por parâmetros estabelecidos nos modelos de previsão de desempenho (PATERSON, 1987).

A Figura 2.30 modificada de HAAS et al. (1994), ilustra o conceito de serventia-desempenho e a curva representam um modelo de desempenho a ser estabelecido em cada caso. Ao se estabelecer o limite mínimo aceitável, define-se a vida útil do segmento.

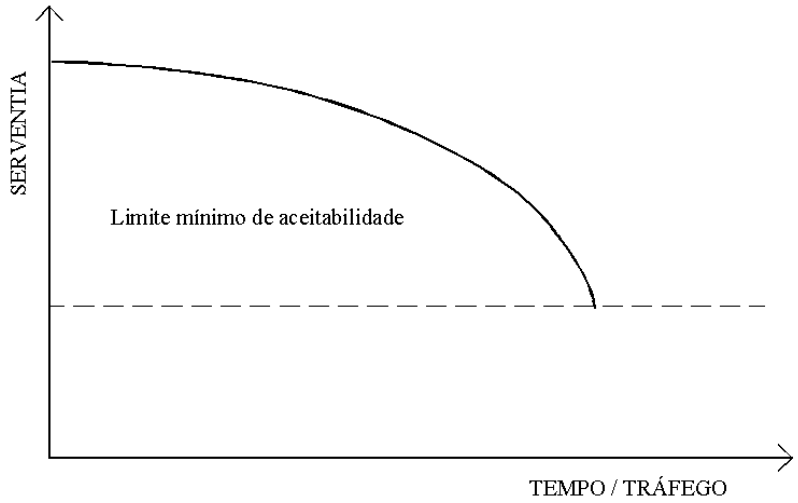


Figura 2.30 Conceito de serventia-desempenho (modificada de HAAS et al., 1994)

A serventia mede a qualidade do serviço que o pavimento proporciona ao usuário em termos de conforto, segurança e economia. A sua recomposição pode ser necessária por uma ou mais das seguintes razões (PATERSON, 1987):

- Qualidade de rolamento inadequada;
- Excesso de defeitos na superfície;
- Redução do coeficiente de atrito entre pneu e pavimento;
- Necessidade excessiva de serviços de conservação;
- Custos elevados para o usuário;
- Capacidade estrutural inadequada para a solicitação de tráfego prevista.

HAAS et al., (1994) relaciona os seguintes fatores que afetam o desempenho dos pavimentos:

- Tráfego**:** carga por eixo, pressão dos pneus, velocidade e volume;
- Meio ambiente**:** temperatura, umidade, radiação, congelamento-degelo, etc.;
- Estrutura**:** espessuras, propriedades dos materiais empregados, condição do subleito;
- Construção**:** métodos de cálculo, qualidades construtivas, mão-de-obra;
- Manutenção**:** material utilizado, determinação do momento propício para a execução, estado e tipo da rodovia.

2.4.2 Desenvolvimento de modelos de desempenho

No desenvolvimento dos modelos requeridos num sistema de gerência de pavimentos, incluindo os modelos de deterioração e de previsão de desempenho, devem ser criadas bases de dados históricos com o monitoramento contínuo e longo das deteriorações (irregularidade, defeitos superficiais, deflexão). As informações mínimas que contribuem para a determinação dos danos relativos atribuídos ao tráfego e aos fatores ambientais e para a previsão do desempenho do pavimento são:

- Características geométricas das seções;
- Medições ou estimativas do tráfego para cada seção;
- Medições de campo: capacidade estrutural, qualidade de rolamento, condição da superfície, resistência à derrapagem. São efetuadas utilizando uma base amostral ou populacional e com um grau de precisão apropriado para a classe de rodovia envolvida;
- Estimativas de custos para a nova construção, para a reabilitação e para a manutenção;
- Identificação dos recursos disponíveis.

Os usos dos modelos de previsão em um SGP abrangem (PATERSON, 1987 & HAAS et al., 1994):

a) Em nível de rede: Planejamento orçamentário, programação de inspeção, priorização de serviços e análise de contingências.

Os objetivos principais são: Decisão sobre tipo de M&R requerida, decisão sobre oportunidade de intervenção, decisão sobre abrangência de M&R.

b) Em nível de projeto: Definição de alternativas específicas de M&R, projeto preliminar das alternativas e análise dos custos no ciclo de vida da cada alternativa.

Os objetivos principais são: Análise econômica comparativa de cada alternativa e seleção de projeto.

O grau de acurácia requerido dos modelos de previsão de desempenho é função do uso para eles desejado. Os modelos para análises em nível de rede podem ser menos acurados do que aqueles destinados para análise em nível de projeto.

Na Figura 2.31, adaptada de HAAS & HUDSON (1978), é mostrado o diagrama de blocos dos principais componentes do projeto de pavimentos, onde o desempenho é destacado.

Antes de adotar os procedimentos de Gerência de Pavimentos, os órgãos governamentais, de todos os níveis, eram solicitados a tomar decisões considerando a

escolha do tipo e do momento de execução dos serviços de manutenção, de reabilitação e de reconstrução dos pavimentos. O processo de decisão era usualmente baseado em abordagem tradicional, ou seja, muitas vezes se consideravam experiências locais, quase sempre sem dados devidamente documentados e que, na maioria das vezes, as preferências ou prioridades eram estabelecidas de forma subjetiva e frequentemente por necessidades ou ações políticas. Esse procedimento é cada vez menos aceitável e deve-se ter um maior rigor na aplicação dos recursos públicos que estão cada dia mais limitados (AASHTO, 1990).

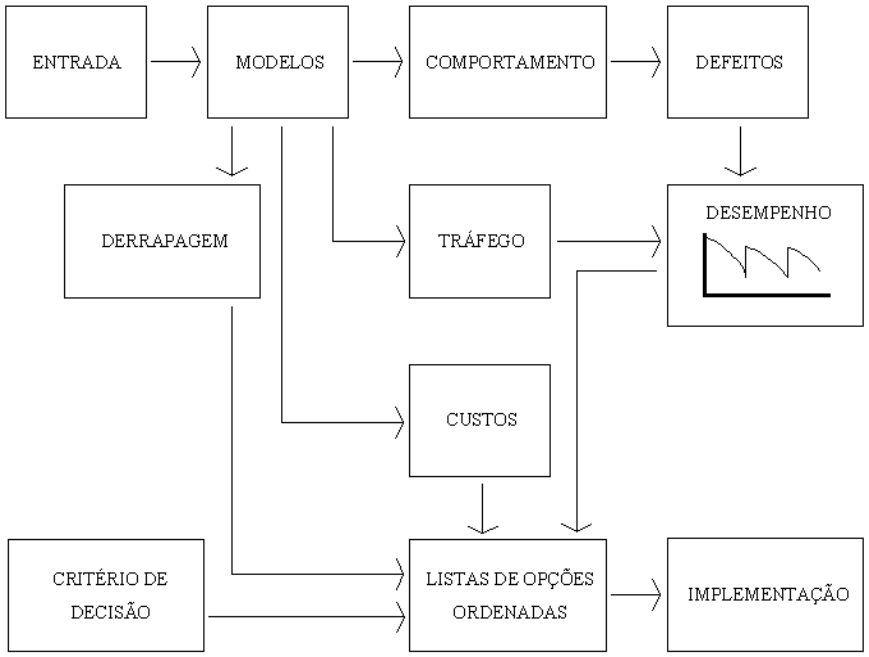


Figura 2.31 Diagrama de blocos dos principais componentes do projeto de pavimentos (adaptada de HAAS & HUDSON, 1978)

A utilização de informações confiáveis e o estabelecimento de critérios de decisão em uma estrutura organizada são citados por QUEIROZ et al. (1992) como principais fundamentações para que se obtenha um sistema de gerência bem administrado e viável. Considerando as necessidades da malha viária, um SGP possibilita analisar e identificar o programa de intervenções que obterá os maiores benefícios no período de análise considerado.

Os modelos de previsão de desempenho são concebidos por critérios estabelecidos que condicionem os níveis mínimos de serventia exigidos e as limitações de recursos. O

sistema deve ser ajustado de forma contínua para que haja aferição das previsões e para que as condições estabelecidas sejam atendidas. Deve haver também, de forma dinâmica, uma participação integrada e coordenada das áreas que estão envolvidas com a construção, com a manutenção e com as suas interfaces (SILVA, 2002).

De um modo geral, os modelos podem apresentar erros nas estimativas de tempo para execução de serviços de manutenção e de reabilitação. Estes erros são maiores quando o pavimento estiver no início de sua vida útil e são menores quanto mais próximos do fim (PATERSON, 1987; HAAS, 1994). Os mesmos autores citam a necessidade de atualização tanto dos modelos como dos devidos ajustamentos.

Para fins operacionais, os modelos de previsão podem ser divididos em quatro tipos básicos (PATERSON, 1987; BUTT, 1988; HAAS et al., 1994;MARCON, 1996;):

- **Puramente Mecanísticos** - baseados em parâmetros, tais como: tensão, deformação ou deflexão. Por possuírem base teórica, para esses modelos não são necessários dados históricos.

- **Empírico-mecanístico** - utilizado por QUEIROZ (1981), usa parâmetros básicos de resposta relacionados com a deterioração funcional ou estrutural por meio de equações de regressão. Os modelos têm a seguinte seqüência lógica: dados de entrada ⟶ modelo ⟶ respostas estruturais ⟶ deterioração ⟶ desempenho.

- **Regressão Direta** – baseiam-se nas relações encontradas entre as variáveis dependentes (aquelas que são a manifestação da deterioração, tais como: irregularidade, trincas, panelas, remendos, profundidade de trilha de roda, etc.) e as independentes (aquelas identificáveis no campo e que influem na deterioração dos pavimentos, tais como: resistência do subleito, número de aplicações de carga, espessuras e propriedades das camadas, fatores ambientais, etc.). Tem como vantagem a fácil aplicação e o fato de serem baseados em dados históricos reais. Como desvantagem pode ser citado que os mesmos precisam de uma base de dados históricos e só podem ser aplicados no espaço de inferência utilizado;

- **Subjetivos** – nestes modelos são utilizadas as experiências dos engenheiros rodoviários, por meio de entrevistas realizadas diretamente, com dados coletados com os mesmos ou através do uso de processos de transição de Markov, por exemplo. Estes modelos são de fácil aplicação, porém empíricos.

A acurácia na previsão do desempenho dos pavimentos é importante para a eficiência do gerenciamento da infra-estrutura de transportes. Reduzindo o erro na previsão de deterioração dos pavimentos, os órgãos rodoviários podem obter significativos ganhos orçamentários, tomando medidas de decisões no tempo certo, advindas de um planejamento mais eficiente. Os modelos de deterioração dos pavimentos não são somente importantes para os órgãos rodoviários gerenciarem as suas redes de rodovias, mas são também utilizados em estudos para estabelecer critérios de cobrança de tarifas nas rodovias. Nestes estudos, são elementos fundamentais, os dados de entrada, o acompanhamento da deterioração dos pavimentos em função do tempo e a relativa contribuição de vários fatores para a deterioração. Os modelos de previsão possibilitam quantificar a contribuição das variáveis mais relevantes para a deterioração dos pavimentos (PROZZI e MADANAT, 2003).

Os modelos de desempenho de pavimentos permitem que seja feita com maior acurácia, por meio do Sistema de Gerência de Pavimentos, as avaliações econômicas dos investimentos, que têm como fundamentos os custos anuais de construção e manutenção, assim como os custos dos usuários. Estas avaliações são essenciais para o planejamento das atividades de reabilitação do pavimento e, portanto, tornam-se imprescindíveis aos SGPs.

Deve ser destacado no custo dos usuários, o custo de operação dos veículos, COV, citado por diversos autores na literatura. Vários fatores afetam o COV, dentre eles, as características das rodovias, do tráfego e do meio ambiente. Os itens mais importantes para a avaliação do COV, são: consumo de combustível, tempo de viagem, velocidade, reposição de peças, reparos dos veículos, óleos lubrificantes, depreciação, etc. (GEIPOT, 1981; AASHTO, 1986; PATERSON, 1987). A redução no COV resultantes de adequadas estratégias de gerenciamento pode ser considerada como uma significativa redução para os usuários, por ser o COV o maior componente destes custos (DEWAN e SMITH, 2002). Um modelo de avaliação de investimentos viários deve ser usado para

auxiliar na escolha do nível apropriado para os padrões de projeto e manutenção, que venham a minimizar o custo total do transporte.

QUEIROZ (1981) destaca que os modelos de desempenho exprimem os comportamentos dos pavimentos em função das variáveis: dependentes (irregularidade longitudinal, afundamentos, índice de serventia, deflexões, trincas) e explicativas (estrutura do pavimento, tráfego e condições climáticas).

Os modelos mais usados que são em geral de regressão, devem ser apropriados para cada Sistema de Gerência de Pavimentos e não são transferíveis, a não ser que sejam feitas modificações, ajustando-os às variações das condições dos pavimentos ao longo do tempo. Como conseqüência, eles refletem as condições das rodovias às quais são aplicados. No desenvolvimento dos modelos são utilizados dados locais, específicos para cada SGP. No Brasil, as diferentes condições climáticas e a diversidade de materiais de subsolos, além de outros fatores, devem estar necessariamente refletidos em qualquer modelo de previsão de desempenho, por terem influência no desempenho dos pavimentos (GEIPOT, 1981).

LEE et al. (2001), analisaram 462 seções de pavimento de 37 projetos no estado de Michigan, Estados Unidos, para investigar a interação entre as irregularidades e os defeitos nas superfícies dos pavimentos. O principal fundamento desta pesquisa foi verificar que um acréscimo na irregularidade resultante de maiores cargas de eixos, pode levar a tangível aceleração dos defeitos nos pavimentos. Ao ser estabelecida uma relação entre estes efeitos, torna-se possível planejar uma ação de manutenção preventiva para regularizar a superfície dos pavimentos, o que permite uma extensão na vida de serviço dos pavimentos. Nesta pesquisa foi usado o RQI (*Ride Quality Index*) para caracterizar as medidas de irregularidades e o DI (*Distress Index*), para quantificar a severidade e a extensão dos defeitos. A análise mostrou uma boa relação entre os dois índices para pavimentos rígidos e compostos com coeficientes de determinação, R^2, igual a 0,739 e 0,624, respectivamente. Porém, para pavimentos flexíveis, a variação do R^2 = 0,375 para DI × RQI e de 0,311 para RQI ×DI, era significativamente dispersa, o que, provavelmente, reflete a alta variabilidade nos pavimentos flexíveis, indicando que os pontos fracos nos pavimentos têm tendência a atrair os danos causados pelas cargas, diferentemente dos pontos mais fortes. A pesquisa relacionou valores limites para as irregularidades em RQI para pavimentos rígidos e compostos, de forma que, a partir

destes valores, sejam acionadas medidas preventivas em função dos desgastes causados aos pavimentos. Para os pavimentos rígidos, por exemplo, foi estabelecido o valor RQI = 64 correspondendo a um IRI de 124 *inches/mile* (polegadas por milha) ou 1,97 m/km.

DEWAN e SMITH (2002) obtiveram modelos relacionando o IRI com o COV (*VOC)*, com a fadiga (F) e com Afundamento (A) e com o ICP (*PCI*) que é um índice de condição composto para o segmento da rodovia, calculado para os tipos de defeitos presentes na superfície do pavimento. Os valores do ICP variam de 0 (zero) para a pior condição a 100 (cem) para a melhor. As constantes a e b são valores tirados em função dos quatro tipos de veículos (carro de passageiro, caminhões pequenos, médios ou articulados). Os modelos são mostrados nas equações 2.23 a 2.26, a seguir:

$$VOC = e^{(a + b*IRI)} \quad (2.23)$$

$$IRI = 0{,}15\ (100 - ICP) \quad (2.24)$$

$$IRI = 0{,}597*IRI\ (inicial) + 0{,}0094*(\%\ fadiga) + 0{,}00847(afundamento) + 0{,}382 \quad (2.25)$$

$$VOC = e^{a + 0{,}15\ b\ (100 - ICP)} \quad (2.26)$$

SALEH e MAMLOUK (2002) desenvolveram um modelo de regressão para estimar a irregularidade em função do número de repetições de carga, do eixo de carga, da espessura da camada de concreto asfáltico e da irregularidade inicial. O modelo é apresentado na equação 2.27.

$$IRI = -1.415 + 0.00129\sqrt{N} + 0.000113T + 2.923\ \sqrt{IRI_o} - 5.485 * 10^{-10} P^4 - 10^{-5}$$
$$T\sqrt{N} + 5.777 * 10^{-12} P^4\ \sqrt{N} \quad (2.27)$$

onde:

IRI = Índice Internacional de Irregularidade, m/km;

N = Número de Cargas Repetidas;

P = Carga Axial, em kN;

T = Espessura da camada de concreto asfáltico em mm;

IRI_o = Valor do IRI inicial, em m/km.

Na Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR) foram desenvolvidos diversos modelos de previsão de

desempenho com dados coletados em sessenta e três segmentos de pavimentos (GEIPOT, 1981). As equações que expressam os modelos foram obtidas, como empírico - mecanísticas e empíricas, utilizando análise de cumieira ou por regressão múltipla utilizando o método dos mínimos quadrados (QUEIROZ, 1981). Alguns modelos empíricos, utilizando regressão são a seguir apresentados:

a.$_1$) Para estimar a Irregularidade Longitudinal do Pavimento, tendo como variáveis independentes, as deflexões, o número N, a idade e o número estrutural:

- $QI = 12,63 - 5,16ER + 3,31TS + 0,393A + 8,66\ (\log NA/NEC) + 7,17 \times 10^{-5} + + (D_{VB} \times \log NA)^2$ (2.28)
  $R^2 = 0,52$ EP = 10,22
- $\log QI = 1,487 - 0,1383\ ER + 0,000795\ A + 0,0224\ (\log NA/NEC)^2$ (2.29)
  $R^2 = 0,26$ EP = 0,13
- $QI = 21,8 - 7,52\ ER + 5,16\ TS + 0,515\ A + 7,22 \times 10^{-5}\ (D_{VB} \times \log NA)^2$ (2.30)
  $R^2 = 0,48$ EP = 10,58
- $\log QI = 1,299 – 0,1072\ ER + 0,0415\ R + 0,0623\ A + 0,0856\ (\log NA/NEC) + + 0,023\ (D_D \times \log NA)$ (2.31)
  $R^2 = 0,36$ EP = 0,13
- $\log QI = 1,391 + 0,1315ER + 0,0414R + 0,0751A + 0,0248\ D_D \times LN$ (2.32)

  $R^2 = 0,32$ EP = 0,130

onde:

Log QI = logaritmo decimal do índice de quarto de carro;

QI = quociente de irregularidade (contagens/km);

ER = variável indicadora do estado de reabilitação (ER = 0, como construído; ER = 1, reabilitado);

TS = variável binária indicadora do tipo de revestimento (TS = 0, para concreto asfáltico; TS = 1, para tratamento superficial duplo);

A = idade do pavimento desde a reconstrução ou reabilitação, em anos;

NA = número equivalente de solicitações do eixo padrão de 80 kN ou 8,2 tf, calculado pelo método da AASHTO ou GEIPOT;

NEC = número estrutural corrigido;

D_{VB} = deflexão máxima medida pela viga Benkelman, em 0,01 mm;

D_D = deflexão máxima medida com o FWD;

R = porcentagem de área que sofreu remendos profundos;

R^2 = coeficiente de determinação;

EP = erro padrão.

Um outro modelo da mesma pesquisa citada que inclui o número estrutural e a deflexão da viga Benkelman e a irregularidade inicial, está mostrada na equação 2.33.

$$QI^* = QI_o^* + (155,5 + 2,07G - 163,8 \frac{B}{B_0} - 165,9 \frac{NEC_0}{NEC} + 172,9 \frac{B}{B_0} \times \frac{NEC_0}{NEC}) \times N/10^6 \quad (2.33)$$

$R^2 = 0,57$ EP = 9,38

onde:

QI_o^* = uma estimativa da irregularidade inicial do pavimento, para o ANO = 0;

$NEC_0 = 5$;

$B_0 = 55$.

Os valores de $\frac{B}{B_0}$ e $\frac{NEC_0}{NEC}$ são mantidos acima de 1. G é função da rampa da estrada, dado por: $G = 1 - \frac{1}{1+10^{GR-4}}$

onde GR é a rampa ascendente, em porcentagem. Na descida, GR = 0.

a.$_2$) Estimativa do valor de N necessário até o surgimento da primeira trinca:

- $\log N = 1,205 + 5,96 \log NEC$ (2.34)
  $R^2 = 0,52$ EP = 0,44

a.$_3$) Estimativa de evolução do trincamento dos pavimentos:

- $CR = -18,53 + 0,0456 (D_{VB} \times \log NA) + 0,00501(D_{VB} \times A \times \log NA)$ (2.35)
  $R^2 = 0,64$ EP = 12,62.
- $CR = -57,7 + 53,5 (\log NA/NEC) + 0,0313 (A \times \log NA)$ (2.36)
  $R^2 = 0,34$ EP = 17,12.

A Figura 2.32 mostra a evolução do trincamento dos pavimentos em relação ao tráfego e a idade do pavimento, tendo como base a equação 2.34.

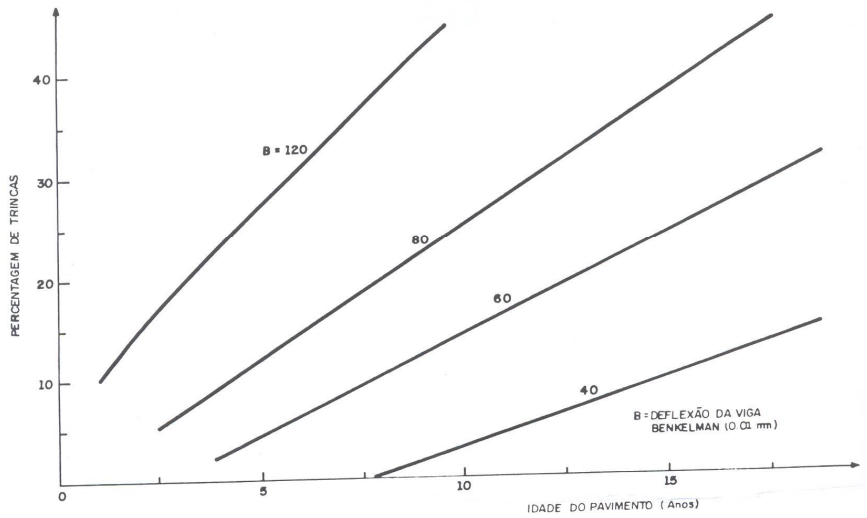


Figura 2.32 Evolução dos trincamentos dos pavimentos, de acordo com a equação 2.34 (GEIPOT, 1981)

a.$_4$) Estimativa da idade na qual se atinge uma certa porcentagem de área trincada no pavimento:

- $A = 11{,}46 - 0{,}0974\ D_{VB} + 0{,}1454\ CR + 2{,}51 \times 105\ [CR/(TAC \times D_{VB})]$ (2.37)

  $R^2 = 0{,}42$. EP = 3,75.

  onde:

  CR = porcentagem de área do pavimento com trincas de classes 2 e 3, e panelas;

  TAC = taxa de aplicações de carga.

b) Modelos considerados como empírico-mecanísticos por HAAS et al. (1994), de dados de GEIPOT (1981):

b.$_1$) Para estimar a Irregularidade Longitudinal do Pavimento:

- $\text{Log QI} = 1{,}426 + 0{,}011A - 0{,}1505\ ER + 0{,}001671\ VSN_3 \times \text{LogNA}$ (2.38)

  $R^2 = 0{,}25$ EP = 0,14.

- $\text{Log QI} = 1{,}297 + 9{,}22 \times 10^{-3}A + 9{,}08 \times 10^{-2}\ ST - 7{,}03 \times 10^{-2}\ ER +$

  $+ 5{,}57 \times 10^{-4} \times SEN_1 \times \text{LogNA}$ (2.39)

  $R^2 = 0{,}51$ EP = 0,11.

Onde como variáveis ainda não citadas, temos:

VSN_3 = deformação específica de compressão vertical no topo do subleito (10^{-4})

SEN_1 = energia de deformação na face inferior do revestimento (10^{-4} kgf.cm).

b.$_2$) Para estimar a previsão do valor de N necessário até o surgimento da primeira trinca:

- $\text{Log NA} = 6{,}87 - 1{,}970 \text{ Log VSN}_1$ (2.40)

  $R^2 = 0{,}31 \quad EP = 0{,}59.$

onde,

VSN_1 = deformação específica de compressão vertical na face inferior do revestimento (10^{-4}).

b.$_3$) Para estimar a previsão da porcentagem de área trincada:

- $CR = -8{,}70 + 0{,}258\ HST_1 - 1{,}006 \times 10^{-7}\ HST_1 \times NA$ (2.41)

onde,

HST_1 = tensão de tração horizontal na face inferior do revestimento (kgf/cm^2).

PROZZI e MADANAT (2003), citam o modelo original desenvolvido com base nos dados dos levantamentos da AASHO Road Test. A equação do modelo estima a deterioração do pavimento em função de um parâmetro *g* definido como perda de serventia em um dado momento, da seguinte forma, equação 2.42:

$$g_t = \frac{p_0 - p_t}{p_0 - p_f} = \left[\frac{N_t}{\rho}\right]^{\omega} \tag{2.42}$$

onde,

g_t = Parâmetro adimensional de perda de serventia;

p_t = Serventia no tempo t (em unidades do PSI);

p_0 = Serventia inicial no tempo t = 0;

p_f = Serventia final;

N_t = Número equivalente de solicitações do eixo padrão de 80 kN aplicados até o tempo t;

ρ, ω = Parâmetros de regressão obtidos para cada seção do pavimento.

Os autores citados criticam as inconsistências na abordagem estatística utilizada para estimar os parâmetros do modelo e contestam as equações de regressão. Além disso, os autores salientam que, apesar dos defeitos identificados, o modelo e as suas

subseqüentes modificações, têm sido utilizados nos projetos há aproximadamente cinqüenta anos. Estabeleceram então um novo modelo para a perda de serventia utilizando os dados da AASHO selecionados de um projeto experimental, com a equação 2.43 a seguir:

$$p = \mathrm{f}\,(N) = a + b\,N^{c} \tag{2.43}$$

onde,

$p =$ Variável dependente representando a serventia do pavimento;

$N =$ Variável independente representando algumas medidas de tráfego;

$a =$ Parâmetro que representa a serventia atual;

$b =$ Parâmetro que representa a taxa de variação da serventia;

$c =$ Parâmetro que representa a curvatura da função.

Nos estudos da PICR foi também obtida uma correlação entre o QI e o PSR ou VSA, por meio da equação 2.44 (GEIPOT, 1981; DNER, 1998):

$$PSR = 4{,}66 \times e^{-0{,}00534 \times QI} \tag{2.44}$$

$R^2 = 0{,}83.$

KSAIBATI et al. (1998), estabeleceram duas equações correlacionando os resultados do IRI com a localização do sensor, à esquerda ou à direita ou com o tipo de sensor, a laser ou ultrasônico, das seguintes formas (equações 2.45 e 2.46):

$$IRI_{esq} = 16{,}5 + 0{,}7 \times IRI_{dir} \tag{2.45}$$

ou

$$IRI_{laser} = 16{,}5 + 0{,}7 \times IRI_{ultrasônico} \tag{2.46}$$

Com $R^2 = 0{,}82$ e a unidade do IRI em *inches/mile*.

MARCON (1996) desenvolveu modelos de previsão de desempenho para rodovias do estado de Santa Catarina, utilizando dados levantados daquela rede viária, de 1990. Nos modelos, o autor relaciona as variáveis: irregularidades, deflexões, índices de gravidade global, trincamentos e profundidades médias das trilhas de roda, com a idade ou o

número equivalente de operações do eixo padrão calculado pelo método da AASHTO (NA). Alguns modelos são a seguir apresentados:

a) Com a deflexão máxima (DEFM):

$$DEFM = 60{,}235 \times IDADE^{0{,}2002} \quad (2.47)$$

$R^2 = 0{,}14$

$$DEFM = 26{,}097 \times NA^{0{,}0954} \quad (2.48)$$

$R^2 = 0{,}19$

b) Com o Índice de Gravidade Global (IGG):

$$IGG = 0{,}51 \times IDADE^2 - 3{,}24 \times IDADE + 16{,}86 \quad (2.49)$$

$R^2 = 0{,}54$

$$IGG = 0{,}0082 \times NA^{0{,}6011} \quad (2.50)$$

$R^2 = 0{,}44$

c) Com o Quociente de Irregularidade (QI):

$$QI = 18{,}348 + 1{,}1635 \times IDADE \quad (2.51)$$

$R^2 = 0{,}29$

$$QI = 25{,}783 + 4{,}0 \times 10^{-6} \times NA - 5{,}0 \times 10^{-14} \times NA^2 \quad (2.52)$$

$R^2 = 0{,}32$

d) Percentual da área do pavimento com trincamento total (ATR)

$$ATR = 0{,}039 \times IDADE^{3{,}1215} \quad (2.53)$$

$R^2 = 0{,}48$

$$ATR = 3 \times 10^{-8} \times NA^{1{,}3981} \quad (2.54)$$

$R^2 = 0{,}53$

e) Com a profundidade da trilha de roda, TRI em mm.

$$TRI = 1{,}5739 + 0{,}176 \times IDADE \quad (2.55)$$

$R^2 = 0{,}24$

$$TRI = 0{,}1262 \times NA^{0{,}2397} \quad (2.56)$$

$R^2 = 0{,}28$

onde:

DEFM = Deflexão máxima média medida com a viga Benkelman, em mm;

IGG = Índice de gravidade global;

QI = Quociente de irregularidade, obtido com o Integrador de irregularidade longitudinal IPR/USP, em contagens/km;
ATR = Trincamento total de área do pavimento, em %;
TRI = Profundidade média de trilha de roda, em mm;
IDADE = Idade do pavimento desde a abertura do tráfego, em anos;
NA = Número equivalente de solicitações do eixo padrão de 80 KN, calculado pelo método da AASHTO ou GEIPOT.

Modelos probabilísticos

Os modelos de desempenho probabilísticos utilizam o processo de transição de Markov, que permite estimar as condições futuras dos pavimentos tendo como base as condições atuais. No desenvolvimento deste processo são coletados dados provenientes das opiniões de técnicos especialistas, para a geração dos modelos.

Os modelos subjetivos de desempenho podem também ser utilizados em cidades onde não existem dados históricos do pavimento. As vantagens destes modelos incluem a possibilidade do desenvolvimento de curvas de desempenho sem dados históricos e a calibração direta. Dentre as desvantagens, a principal é a necessidade do desenvolvimento de matrizes de probabilidades de transição para cada combinação de fatores que afetam o desempenho do pavimento, tais como: tipo de pavimento, espessura das camadas, volume e cargas do tráfego e o tipo de subleito (MACLEOD e WALSH, 1998; BUTT et al., 1988).

O processo de Markov é um processo estocástico que, por ser baseado em modelos subjetivos, estima o estado de condição futura do pavimento apenas conhecendo a condição presente, não necessitando da situação passada. O processo de Markov tem como fundamentação a determinação de vetores-estado e a composição de matrizes de probabilidades de transição para cada seção do pavimento (BUTT et al., 1988).

O modelo de Markov incorpora o comportamento não determinístico de deterioração dos pavimentos usando princípios estatísticos (BUTT et al., 1988). As futuras decisões de ações de preservação, no processo de Markov não são fixadas por dependerem do desempenho atual dos pavimentos (MACLEOD e WALSH, 1998). A maior disponibilidade dos dados facilita a atualização do modelo de Markov, possibilitando

assim mais eficiência nas previsões de desempenho dos pavimentos (COOK e KAZAKOV,[5] 1984 apud MACLEOD e WALSH, 1998).

O Índice de Condição do Pavimento (ICP) é utilizado como escala de medição das condições dos pavimentos na determinação dos vetores-estado das respectivas seções. O vetor estado indica a situação atual do processo, sendo aferida por uma única variável ou um conjunto de variáveis. O ICP varia de 0 a 100, sendo dividido em um número de intervalos que corresponde a igual número de intervalos de matriz, determinando, por sua vez, os estados de condição das seções. Assim, no caso de dez intervalos iguais, os vetores-estado têm 10 colunas de matriz, com a primeira indicando a probabilidade de a seção ter um ICP de 90 a 100, a segunda de 80 a 90 e assim por diante. No caso de vinte intervalos iguais, os vetores-estado têm 20 colunas de matriz, com a primeira indicando a probabilidade de a seção ter um ICP de 95 a 100, a segunda de 95 a 90 e assim por diante.

O vetor-estado inicial p (0) da seção é estabelecido, como um exemplo genérico, no caso de 10 intervalos, p (0) = (0,2; 0,7; 0,1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0). A seguir são determinadas as matrizes de probabilidade de transição das seções, utilizando dados históricos de desempenho dos pavimentos das seções em estudo. As matrizes também podem ser estimadas por meio de dados tirados da opinião de especialistas, capazes de prever as necessidades futuras.

Algumas hipóteses são admitidas na composição das matrizes de transição, dentre elas, considerar que não há mais do que uma alteração no estado de condição dos pavimentos de um ano para outro, ou seja, durante um ciclo de solicitação. Outra hipótese seria considerar o valor do ICP entre 90 e 100 logo após a construção, primeira linha. Na matriz de cada seção, a primeira linha apresenta as probabilidades de permanecer na condição inicial ou passar para outro estado de condição inferior, após o primeiro ciclo. A segunda linha, ICP entre 80 e 90, a terceira linha entre 70 e 80 etc. Assim, verifica-se que para cada um dos dez estados de condição, como neste caso, só há necessidade de se preencher as duas diagonais centrais, com os respectivos valores das probabilidades

[5] COOK, W.D. e KAZAKOV, A., (1987), "Pavement Performance & Risk Modelling Rehabilitation Budget Planning: A Markov Approach". Proc. Second International Conference on Managing Pavements, Toronto, Ontario.

de uma seção permanecer ou passar para outro estado imediatamente inferior durante um ciclo de solicitação (ZERBINI e FERNANDES JR., 1999).

Na figura 2.33 é mostrado um exemplo de matriz de probabilidade de transição, começando com a probabilidade de 0,8 de a seção continuar apresentando ICP entre 90 e 100 no primeiro ano e 0,2 de passar para um ICP de 80 a 90 no ano seguinte. No quarto estado de condição (ICP entre 70 e 60), têm-se probabilidades de 0,7 e 0,3 respectivamente.

$$P = \begin{vmatrix} 0,8 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,7 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0,4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0,4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} =$$

Figura 2.33 Exemplo de uma matriz de probabilidade de transição para 10 níveis de estado

Para qualquer ciclo de solicitação, o vetor estado p(t) é determinado pela multiplicação do vetor inicial p(0) pela matriz de transição P elevada à potência t. Desta maneira, pode ser previsto, para qualquer ciclo de solicitação, o estado futuro do pavimento. Assim tem-se:

$p(1) = p\,(0) \times P;$
$p(2) = p\,(1) \times P = p\,(0) \times P^2$
$p(3) = p\,(2) \times P = p\,(0) \times P^3$
$p(t) = p(t-1) \times P = p\,(0) \times P^t$

Seja por exemplo, o vetor estado p(5) = (0,01; 0,18; 0,34; 0,30; 0,12; 0,05; 0,00; 0,00; 0,00; 0,00), tem-se que o ICP_5, previsto para o ciclo de solicitação de 5 anos, p(5), será

igual a soma dos produtos das probabilidades pelo ICP médio de cada estado de condição, equação 2.57, no caso, o resultado foi ICP = 70:

$$ICP_5 = 0{,}01x\ 95 + 0{,}18\ x\ 85 + 0{,}34\ x\ 75 + 0{,}30\ x\ 65 + 0{,}12\ x\ 55 + 0{,}05\ x\ 45 = 70 \quad (2.57)$$

2.5 MODELOS DO PROGRAMA HDM

2.5.1 Antecedentes Históricos

O primeiro passo para gerar um modelo de avaliação de projetos de rodovias se deu em 1968 por iniciativa do Banco Mundial. O primeiro modelo foi produzido como conclusão de um estudo sobre projeto de rodovias realizado pelo Banco Mundial conjuntamente com o *Transport and Road Reserch Laboratory* (TRRL) e com o *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC).

Posteriormente, o Banco Mundial deixou a cargo do *Massachussetts Institute of Technology (MIT)* a realização de um estudo sobre a bibliografia existente e a construção de um modelo baseado no conjunto de informações disponíveis. O modelo resultante – Highway Cost Model (HCM) – produzido pelo MIT (MOAVENZADEH et al., 1971) representou um considerável avanço sobre outros modelos utilizados para examinar as inter-relações entre custos das obras e custos de operação de veículos.

O modelo HCM ressaltava as áreas onde se considerava necessária uma maior investigação para proporcionar um modelo que fosse mais adequado para os casos de países em desenvolvimento, com relações adicionais específicas para atender tais situações.

Em continuação, o TRRL, em parceria com o Banco Mundial, deu origem a um importante estudo de campo no Quênia para investigar a deterioração de rodovias pavimentadas e não pavimentadas, assim como os fatores que afetam os custos de operação de veículos em um país em desenvolvimento. Os resultados deste estudo foram utilizados pelo TRRL para produzir a primeira versão do protótipo do Modelo de Investimento em Transporte Rodoviário (RTIM), para países em desenvolvimento (ABAYNAYAKA, 1977). Em 1976, o Banco Mundial financiou novas implementações do HCM desenvolvidas pelo MIT que produziu a primeira versão do Modelo de padrões

de projeto e conservação de rodovias (*Highway Design and Maintenance Standard Model*) – HDM.

Outros trabalhos adicionais foram realizados em diversos países para ampliar o âmbito geográfico dos modelos RTIM e HDM:

- O Estudo do Caribe, pelo TRRL:

  Investigava os efeitos da geometria das rodovias nos custos de operação de veículos (MOROSIUK & ABAYNAYAKA, 1982);

- O Estudo da Índia:

  Estudava os problemas operacionais particulares das rodovias da Índia em seções extensas de pavimentos e grandes proporções de volume de tráfego não motorizado (CRRI, 1982);

- O Estudo do Brasil:

  Ampliava a validade de todas as relações entre os modelos já estabelecidos nas pesquisas anteriores (GEIPOT, 1982).

Os resultados dos estudos do TRRL foram usados para desenvolver o modelo RTIM2 (PARSLEY e ROBINSON, 1982). Enquanto isso, o Banco Mundial desenvolvia um modelo mais completo que incorporava o que foi averiguado em todos os estudos anteriores, resultando no HDM-III (WATANATADA et al., 1987). Ambos os modelos foram projetados originalmente para operar em órgãos de gerência centralizados e, à medida que a tecnologia da informática foi avançando, a Universidade de Birminghan produziu uma versão para microcomputadores do RTIM2, para o TRRL. Posteriormente, o Banco Mundial produziu o HDM-PC, uma versão para microcomputadores de HDM-III (ARCHONDO-CALLAO e PUROHIT, 1989).

Seguiram-se o desenvolvimento de ambos os modelos. O TRRL produziu o RTIM3 em 1993 para oferecer uma versão do software mais fácil de usar, em forma de planilha de cálculo. Em 1994, o Banco Mundial produziu outras versões do HDM, como listado a seguir, (CD HDM 4, 2004):

- HDM-Q:

  Incorporava os efeitos do congestionamento de tráfego no programa HDM-III;

- HDM Manager

Proporcionava uma interface com o usuário ao HDM-III.

Nos modelos desenvolvidos no HDM III, as bases empírico-mecanísticas aceitam um ajuste mais fácil às condições diferentes para as quais foram desenvolvidas, pelo simples fato de que os modelos de deterioração foram validados a partir de características diversas de países diferentes. A estrutura conceitual do modelo HDM III produz como resultado final elementos que oferecem alternativas viáveis que podem ser escolhidas para proporcionar custos mínimos para o transporte rodoviário, especialmente no subsistema relativo ao pavimento, que representa grande parcela dos custos de manutenção rodoviária.

Os modelos do HDM III possibilitam uma adequada avaliação econômico-financeira da composição dos custos de recuperação dos pavimentos deteriorados por guardar estreita relação com as características estruturais das rodovias brasileiras. O HDM III permite a simulação de diferentes situações de tráfego em um determinado trecho de rodovia, estimando para cada situação, o montante de recursos necessários para a conservação do pavimento. A partir daí é possível efetuar a distribuição destes custos entre os diferentes tipos de veículos.

2.5.2 Estrutura de dados do HDM III

Controle de análise

Informações necessárias: o nome do projeto, o período de análise, a taxa de desconto, a data de início, a moeda e o fator de conversão.

Características da rodovia

Informações necessárias: as características da rodovia por três conjuntos de dados que definam a geometria da rodovia, os dados do tráfego e as condições ambientais a que estão submetidas as condições estruturais do pavimento.

Frota de veículos

Em relação à frota de veículos são informados, para cada tipo de veículo, o peso bruto em toneladas, o número de eixos e o fator de equivalência do eixo padrão de 8,2 tf.

Definição das estratégias

Informações quanto às alternativas de conservação e custos correspondentes às diversas operações que compõem cada estratégia.

Resultados fornecidos pelo HDM III

O HDM III fornece os resultados em quatro grupos distintos de saída a seguir indicados.

Deterioração

Os resultados apresentados são relativos à evolução das condições do pavimento, ou seja, as condições de deterioração através dos valores dos diferentes defeitos que vão surgindo ao longo do tempo.

Impactos aos usuários

Os resultados são relativos aos valores de custos operacionais, velocidades e fluxos dos veículos que utilizam à rodovia.

Fluxo de custos

Os custos econômicos e financeiros a serem suportados ao longo do tempo.

Análise econômica

As taxas internas de retorno para cada estratégia prevista.

2.5.3 Objetivos do desenvolvimento do sistema HDM-4

Diferentes versões dos modelos de deterioração e de análise têm sido amplamente utilizadas nas duas últimas décadas em diversos países e se tornaram fundamentais para justificar os cada vez maiores orçamentos de conservação e reabilitação de rodovias, em muitos deles. Muitos modelos foram usados para avaliar a viabilidade econômica de projetos em mais de 100 países e para otimizar os benefícios econômicos de usuários de rodovias em diferentes níveis de gastos. Assim, se constituíram em avançadas ferramentas de análise de investimento em rodovias, com amplas possibilidades de aplicação em diversos climas e condições. Foi reconhecida pelo Banco Mundial a necessidade fundamental de desenvolvimento de novos modelos para incorporar uma gama mais ampla de pavimentos e condições de uso e incorporar as práticas e tecnologias de informação mais modernas no pacote do HDM III (CD HDM 4, 2004).

As relações técnicas contidas nos modelos RTIM3 e HDM III tinham mais de 10 anos de uso já em 1995. Apesar de muitos modelos de deterioração de rodovias incorporados

ao HDM III ainda serem perfeitamente válidos, havia a necessidade de incorporar os resultados das muitas investigações realizadas em todo o mundo a partir da finalização do HDM III.

No caso dos custos de operação de veículos, reconhecia-se que a tecnologia destes havia melhorado muito desde 1980, por este motivo os custos típicos de operação poderiam ser bastante menores que aqueles obtidos nas previsões dos modelos RTIM3 e HDM III. Por outro lado, era necessário atualizar as relações técnicas para refletir assim os últimos avanços.

Apesar de muitas aplicações dos diferentes modelos utilizados nos países em desenvolvimento, nos últimos anos, outros países industrializados começaram a utilizar o modelo HDM. Evidenciou-se então que seria necessário incluir funções adicionais como, por exemplo, modelos para:

- Efeitos do congestionamento do tráfego;
- Efeitos de climas frios;
- Uma gama mais ampla de pavimentos e estruturas;
- Segurança viária;
- Efeitos ambientais (consumo de energia, ruído proveniente do tráfego e emissões de veículos).

Tais antecedentes apresentados serviram de referência para o desenvolvimento do HDM-4.

2.5.4 O papel do sistema HDM-4 na Gestão de Rodovias

Ao considerar as aplicações do HDM-4, é necessário completar o processo de gestão de rodovias quanto às seguintes funções (KERALI et al., 1998a; CD HDM 4, 2004):

- Planejamento;
- Programação;
- Preparação;
- Operação.

Cada uma destas funções se realiza como uma seqüência de atividades conhecidas como ciclo de gerência.

Planejamento

O planejamento compreende a análise do sistema de rodovias em seu conjunto e, tipicamente, demanda a preparação de orçamentos estratégicos a médio e longo prazo, de estimativas de gastos de desenvolvimento e conservação de rodovias. Podem ser feitas previsões da condição das redes de rodovias por diferentes níveis de financiamento, em termos de índices-chave, juntamente com previsões dos gastos necessários em parcelas de recursos definidos. Na etapa de planejamento, os sistemas físicos de rodovias normalmente se caracterizam por:

- Características da Rede;
    - Classe ou categoria da rodovia;
    - Fluxo/cargas/congestionamento do tráfego;
    - Tipos de pavimentos;
    - Estado do pavimento.
- Dimensão longitudinal da rodovia em cada categoria;
- Características da frota de veículos que utiliza a rede.

Os resultados do planejamento são de máximo interesse para quem define as políticas do setor, tanto no âmbito político como no profissional.

Programação

A programação compreende a preparação, sem restrições definidas, de programas de gastos e obras de vários anos, nos quais são selecionados e analisados trechos da rede que necessitarão de conservação, reforço ou reconstrução. Idealmente, deveria realizar-se uma análise da relação custo-benefício para determinar a viabilidade econômica de cada conjunto de obras.

Na fase de programação, na rede de rodovias, considera-se itinerário por itinerário, com cada um deles, caracterizado por segmentos de pavimentos homogêneos, definidos em termos de atributos físicos. A atividade de programação produz estimativas de gastos para cada ano, sem prazos disponíveis definidos, para diferentes tipos de obras e de trechos de rodovias. Um dos aspectos-chave da programação é assinalar as prioridades relativas às obras para utilizar-se de forma otimizada os recursos disponíveis. As aplicações mais típicas são as programações de recursos para um programa de obras

anual ou plurianual em uma rede ou sub-rede de rodovias. Os profissionais de nível de gestão da organização rodoviária normalmente devem realizar as atividades de programação, talvez com um departamento de planejamento ou de conservação.

Preparação

Esta é a fase de planejamento em curto prazo, onde os planos de rodovias aprovados se agrupam para serem realizados. Nesta fase, os projetos são detalhados, fazem-se quantitativos e orçamentos detalhados, junto com as instruções ou normas das obras e contratos. Também podem ser feitas as especificações, além dos custos detalhados e uma programação final. As obras sobre trechos de rodovias adjacentes podem ser combinadas em lotes de uma forma que seja rentável para a execução. As atividades típicas da preparação de um projeto detalhado são, por exemplo, a construção de um novo traçado, manutenção da rodovia, reconstrução do pavimento, etc.

Para estas atividades normalmente já estarão aprovados os recursos. As atividades de preparação devem ser realizadas por profissionais e técnicos de nível sênior de um departamento de projeto ou implantação de uma organização de rodovias e por pessoal dos setores de contratos e compras.

Operação

As decisões sobre a gestão de operação devem ser tomadas de forma diária ou semanal, incluindo a programação das obras a realizar, a supervisão em termos de mão-de-obra, equipes e materiais, o registro das obras finalizadas e o uso destas informações para supervisão e controle. As atividades centralizam-se normalmente em trechos ou sub-trechos individuais de uma rodovia, fazendo-se freqüentemente as medições com um nível bastante detalhado. As operações devem ser dirigidas por profissionais como supervisores, técnicos, encarregados e outros.

Os detalhes dos dados começam como um resumo geral, evoluindo progressivamente em níveis de maior detalhamento, entre as atividades de planejamento e operação, como pode ser observado na Tabela 2.18.

Tabela 2.18 Inter-relações dos processos de gestão (adaptada de PATERSON e SCULLION, 1990)

Atividade	Horizonte Temporal	Responsabilidade Pessoal	Cobertura Espacial	Detalhe dos Dados	Modo de Operação
Planejamento	A longo prazo (estratégica)	Alta administração em nível político	Toda a rede	Resumido	Automático
Programação	A médio prazo (tática)	Profissionais de nível sênior	Rede ou subrede	... ↓	... ↓
Projeto	Ano do orçamento	Profissionais de nível júnior	Trechos/seção	...	...
Operação	Imediato/a curto prazo	Técnicos/ profissionais	Canteiro de obra	Detalhado	Interativo

2.5.5 Conceito estrutural do HDM 4

No HDM 4 existem quatro submodelos (módulos) utilizados como ferramentas de análise técnica do programa. Os três primeiros, equivalentes aos já utilizados no HDM III, são (KERALI et al., 1998):

- RD - deterioração de rodovias, utilizado para prever a deterioração dos pavimentos;
- MIE - efeito das intervenções nos trabalhos de manutenção, além do efeito no estado da rodovia, determina os respectivos custos;
- RUC - efeito sobre os custos dos usuários, contemplando custos operacionais dos veículos, dos acidentes e dos tempos de viagem.

O quarto submodelo, SEC, sócio econômico, permite a previsão de acidentes e os efeitos sociais e ambientais, causados pelos efeitos das emissões dos veículos e do consumo de energia.

O HDM 4 pode também ter uma interface com sistemas externos, tais como:

- Banco de dados: Sistemas de informações de rede de rodovias, sistemas de gerência de pavimentos, etc. usando o arquivo Converter;

- Modelos técnicos: Podem ser acessados diretamente por sistemas externos para aplicação em pesquisas ou outros estudos.

O sistema de projeto é modular, com uma interface integrada entre os módulos. O sistema modular possibilita aos usuários a substituição de modelos técnicos inadequados por seus próprios modelos. As relações técnicas são todas implementadas de maneira tal a permitir uma fácil calibração para as condições locais. Isto é efetuado através do HDM 4 *set-up*, que define todos os dados que serão analisados.

KLEIN et al. (2006) fixaram um cenário de fatores que compõem o modelo HDM 4: tipo de fluxo de tráfego, classe da rodovia, composição e volume de tráfego, dentre outros, que permitiram uma análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados às curvaturas vertical e horizontal das vias. Este estudo possibilitou a quantificação dos efeitos da geometria sobre todas as parcelas que compõem os custos dos usuários. Os citados autores destacam na conclusão que a geometria pode ter grande influência nos custos totais dos usuários, e que os seus efeitos devem ser considerados em projetos de construção e manutenção de rodovias.

Na tabela 2.19 são mostradas as comparações nas modelagens de custos de operação de veículos nos sistemas HDM III e HDM 4.

A Tabela 2.20 apresenta uma comparação dos modelos de deterioração de rodovias RD, e o modelo MIE de efeito das intervenções nos trabalhos de manutenção.

A Tabela 2.21, adaptada de KERALI et al., 1998a, mostra como o HDM 4 é utilizado no ciclo de atividades das funções dentro de um Sistema de Gerência de Pavimentos. Na tabela 2.22 é apresentado o ciclo de vida do HDM 4.

Tabela 2.19 Comparação de modelos de Custos de Operação de Veículos (VOC) nos Sistemas HDM III e HDM 4 (adaptada de KERALI et al., 1998b)

Modelos	**HDM III**	**HDM 4**
Velocidade Livre	Modelo baseado nas 5 velocidades limitantes (VDESIR, VBRAKE, VCURVE, VDRIVE e VROUGH).	Assim como no HDM III, exceto: - VDESIR incorpora XNMT, XFRI; VDRIVE incorpora a Resistência ao giro; A equação VCURVE tem sua forma modificada; VBRAKE incorpora o conceito de gradiente de Seção.
Velocidade em Congestionamento	Não é modelado no HDM III (incluído no HDM95).	Modelo baseado em relações fluxo-velocidade.
Consumo de Combustível	Usa o estudo do Brasil sobre o modelo de consumo de combustível.	Novo modelo baseado no Modelo Mecânico de Combustíveis ARFCOM.
Consumo de Pneus	O estudo do Brasil sobre o modelo de consumo de pneus: diferentes formas de equações para temperatura e carga de veículos.	Baseado no modelo do HDM III para carga de veículos com: - Coeficientes do modelo alterados; - Incorporação de Efeitos de Congestionamento.
Consumo de Óleos e Lubrificantes	Prevista como função da irregularidade.	Previsto com função do consumo de combustível, capacidade de óleo do motor, e distância entre trocas de óleo.
Uso do Veículo	Três métodos são usados: - Quilometragem Anual Constante; Horas de Trabalho Anuais Constantes; Método de Utilisação Ajustado	Usa o Método Único das Horas de Trabalho Anuais Constantes.
Vida Útil do Veículo	Dois métodos são usados: -Método da Vida Útil Constante do Veículo; -Método da Variação de Vida Útil.	Dois métodos são usados: Método da Vida Útil Constante do Veículo; Método da Vida Ótima do Veículo.
Consumo de Componentes	Dois tipos diferentes de equações são usados dependendo do valor da Regularidade de Transição para cada tipo de veículo.	- Uma forma geral de equação é utilizada - Efeitos de Congestionamento são incorporados.
Horas de Trabalho	Modeladas como uma função do Consumo de Componentes e da regularidade.	Modeladas como função somente do Consumo de Componentes.

Tabela 2.20 Comparação de Modelos de Deterioração de Vias no HDM III e HDM 4 (adaptada de KERALI et al., 1998b)

Modelos RD e MIE	HDM III	HDM 4
Classes do Revestimento de Vias	- Revestimento Asfáltico; - Sem Revestimento.	- Revestimento Asfáltico; - Sem Revestimento; - Revestimento de Concreto; - Blocos (proposta).
Parâmetros de Resistência de Pavimentos	- Número Estrutural; - Deflexão obtida com Viga Benkelman.	- Número Estrutural; - Deflexão com Viga Benkelman; - FWD (proposta).
Qualidade de Construção	Um simples indicador (CQ), com valor de 0 ou 1.	Dois indicadores, CDB e CDR, com a variação contínua entre 0 e 1,5.
Defeitos	Compreende: Defeitos Gerais, Defeitos em Rede e Defeitos em Evolução.	Compreende: - Defeitos Estruturais (Gerais, em Rede, em Evolução),
Trincas e Fissuras	Modelado.	Como no HDM III, mas com alterações nos coeficientes do modelo.
Buracos	Previsto como uma porcentagem da área da pista de rolamento.	Previsto como o número de buracos por quilômetro.
Irregularidade (IRI)	Compreendendo: - Deterioração Estrutural; - Defeitos Rotineiros; - Buracos; - Meio Ambiente;	Compreendendo: - Deterioração Estrutural; - Defeitos Rotineiros; - Buracos; - Meio Ambiente; - Remendos.
Profundidade e Textura (TD)	Não é Modelado.	Incluído
Resistência a Derrapagem	Não é Modelado.	Incluído
Manutenção de Vias	Não é Modelado.	Tipos de trabalho adicional: Polimento e substituição, Selagem de Trincas
Melhoramentos de Vias	Não é Modelado.	Tipos de trabalho adicional: Alargamento e Realinhamento.
Novas Construções com Desvio de Tráfego	O Desvio de Tráfego não é considerado.	Desvio de Tráfego incluso.

Tabela 2.21 Ciclo de atividades e função de gerência do HDM 4 (adaptada de KERALI et al., 1998)

Função na Gerência	Exemplos de descrições correntes	Aplicação do HDM 4
Planejamento	Análise estratégica do sistema	Análise estratégica
	Panejamento do sistema em nível de rede	
	Sistema de gerência de pavimentos	
Programação	Análise de programação do sistema	Análise de programa
	Sistema de gerência de pavimentos	
	Sistema de orçamentos	
Preparação	Análise do sistema em nível de projeto	Análise de projeto
	Sistema de gerência de pavimentos	
	Sistema de gerência de pontes	
	Sistema de projeto de revestimentos	
	Sistema de contrato de compras	
Operação	Sistema de gerência de projetos	Não é considerado no HDM 4
	Sistema de gerência de manutenção	
	Sistema de gerência de equipamentos	
	Gerência financeira	

Tabela 2.22 Análise do Ciclo de Vida com a utilização do HDM-4 Manual do HDM v.2 (adaptada de KERALI et al., 1998)

Dados de Entrada	Modelo	Dados de Saída
Tipo do Veículo, Volume, Estimativa de Crescimento, Carregamento, Parâmetros Físicos, Área, Precipitação Pluviométrica, Geometria da Estrada, Características do Pavimento, Custo Unitário	Início do Ciclo de Análises	
Tipo de pavimento, resistência, idade, condição, e ESAL.	Deterioração da Rodovia	Trincas, desagregação, panelas, afundamento, defeitos em geral (vias pavimentadas), revestimento primário (vias não pavimentadas); rugosidade.
Geometria e rugosidade da rodovia; velocidade do veículo, pneu, congestionamento, parâmetros, custos unitários.	Efeitos do Uso da Rodovia	Combustível, lubrificante, pneus, manutenção, custos fixos, velocidade, tempo de viagem, custos do usuário.
Serviços rodoviários padronizados e estratégias	Efeitos de Serviço	Trincas, desagregação, panelas, afundamento de trilha de roda, espessura de camada de pedras (vias não pavimentadas); rugosidade, interferências e custos administrativos.
Geometria da rodovia e textura da superfície, características dos veículos.	Efeitos Sociais e Ambientais	Níveis de emissão e consumo de energia, e número de acidentes.
Desenvolvimento, acidentes, meio ambiente e outros custos e benefícios externos.	Análise Econômica	Custos e benefícios, incluindo benefícios externos.
	Retorna ao Início do Ciclo de Análises	Custo total por componente; série de valores presentes e taxas de retorno por seção.

2.5.6 Modelos de previsão de desempenho do programa HDM

Diversos modelos de previsão de desempenho foram desenvolvidos no programa HDM. Importantes parâmetros que devem ser considerados para a qualificação dos pavimentos de uma rodovia como afundamento de trilha de roda, irregularidade longitudinal, aparecimento de panelas, evolução de trincas, etc., foram contemplados no desenvolvimento destes modelos.

De modo geral, os modelos foram inicialmente utilizados em países em desenvolvimento. Porém, nos últimos anos, houve uma participação dos países industrializados, o que ampliou ainda mais a necessidade de inclusão de novas funções e consequentemente de evolução dos modelos.

PATERSON (1987), utilizou dados coletados para a PICR para desenvolver as equações de previsão de deterioração de pavimentos aplicadas no HDMIII - *The Highway Design and Maintenance Standards Model*. Algumas destas equações foram estruturadas com fundamentos em conceitos mecanísticos e outras obtidas por análise de regressão. Algumas equações são:

a) Progressão da área do trincamento da camada de revestimento de concreto asfáltico:

$$\Delta ACRA_d = K_{cp} \times Z_a \left[(Z_a \times a_i \times b_i \times \Delta TCRA + SCRA^a)^b \right]^{1/b} \times SCRA_a \qquad (2.58)$$

onde:

$\Delta ACRA_d$ – mudança prevista na área de trincamento, durante o ano de análise, devido à deterioração, em porcentagem da área total do revestimento;

K_{cp} – fator de deterioração para progressão do trincamento;

CRP – fator de retardamento de progressão do trincamento devido ao tratamento preventivo, dado por:

CRP = 1- 0,12 CRT;

$Z_a = 1$, se ACRA < 50 e $Z_a = -1$, caso contrário;

a_i e b_i – coeficientes determinados em função do tipo de revestimento: a = 1,84 e b = 0,45 para concreto asfáltico;

ΔTCRA – período de tempo em que ocorre evolução de todos os tipos de trincas, em anos:

$\Delta TCRA = (AGE2 - TYCRA)$ se $(AGE2 - 1) < TYCRA \leq AGE2$ E $ACRA_a = 0$

$\Delta TCRA = 1$ se $TYCRA \leq (AGE2-1)$ ou $ACRA_a > 0$.

AGE2 – idade do pavimento desde a construção, execução de camada selante, reabilitação ou reconstrução, em anos;

$SCRA_a$ – mínimo ($ACRA_a$, 100 - $ACRA_a$);

$SCRA_a$ – mínimo ($SCRA_a$, 0,5) se $ACRA_a > 0,5$;

$ACRA_a$ – porcentagem de área de trincamento do pavimento igual a:

$ACRA_a = 0$, se $\Delta TCRA = 0$;

$ACRA_a = 0,5$, se $\Delta TCRA < 1$;

$ACRA_a = ACRA$, em outros casos.

b. Estimativa do trincamento em pavimentos asfálticos sobre bases granulares:

$$TYCRA = K_{ei} (F_c \times RELIC \times CRT) \quad (2.59)$$

$$TYCRA = K_{ei} (F_c \times RELIA \times CRT) \quad (2.60)$$

onde:

$RELIC = 4,21\ EXP(0,14 \times NEC - 17,1YE_4 / NEC^2)$

$RELIA = 13,2\ EXP[-20,7(1 + CQ)YE_4 / NEC^2]$

RELIC – pavimentos de concreto asfáltico sobre bases granulares;

RELIA – pavimentos com tratamentos superficiais sobre bases granulares;

TYCRA – número médio de anos para o aparecimento de trincas;

K_{ei} – fator de deterioração para o início do trincamento, calculado pela relação entre a idade esperada do revestimento e a idade prevista pelo modelo HDMIII, para o mesmo volume de tráfego;

F_c – fator de distribuição de ocorrência para o início do trincamento, cujos valores recomendados se encontram no modelo HDMIII para várias classes de clima;

CRT – tempo estimado de retardamento do início do trincamento devido à realização dos serviços de manutenção, em anos;

YE_4 – número de operações do eixo equivalente de 80kN para o ano de análise, calculado pelo método da AASHTO, em milhões por faixa de tráfego;

NEC – número estrutural corrigido;

CQ – indicador qualitativo da construção da camada de revestimento asfáltico, sendo CQ = 1 se o revestimento tem falha construtiva, caso contrário CQ = 0.

c) Estimativa da profundidade média das trilhas de roda:

$$RDM_a = K_{cp} \times \_39800\ (YE4 \times 10^6)^{ERM}\ (NEC^{0,502})(COMP^{-2,30}) \qquad (2.61)$$

onde:

RDM_a – profundidade média da trilha de roda em ambas as trilhas, em mm;

K_{cp} – fator de deterioração especificado pelo usuário para a progressão da profundidade média das trilhas de roda;

YE4 – número de operações do eixo padrão equivalente a 80 kN para o ano de análise, calculado pelo método da AASHTO, em milhões por faixa;

NEC – número estrutural corrigido;

COMP – compactação relativa das camadas de base, sub-base e do subleito selecionado, em porcentagem.

A equação acima é usada diretamente para estimar ΔRDM_d, no primeiro ano, quando o RDM = 0, porém, em seguida, o acréscimo na profundidade média das trilhas de roda provocado pela deterioração durante o ano de análise é em função de:

$$\Delta RDM_d = K_{cp} \left\{ \frac{0{,}166 + ERM}{AGE3} + 0{,}021119 \times MMP \times \Delta CRX_d \times \ln\left[máx \begin{pmatrix} 1; \\ AGE3 \\ xYE4 \end{pmatrix} \right] \right\} \times$$

RDM_a, se $RDM_a > 0$ (2.62)

onde:

ΔRDM_d – mudança da profundidade média da trilha de roda durante o ano de análise devido à deterioração, em mm;

ERM – valor do expoente que é função das características da superfície do pavimento e precipitação, dado por:

$ERM = 0{,}09 - 0{,}0009RH + 0{,}0384DEF + 0{,}00158MMP \times CRX_a$

onde:

CRX_a – área de trincamento no início do ano de análise, dado por:

$CRX_a = 0{,}062ACRA_a + 0{,}39ACRWa$

$\Delta CRX_d = 0{,}62(ACRA_b - ACRA_a) + 0{,}39(ACRW_b - ACRW_a)$

MMP – precipitação média mensal, em mm/mês;

AGE3 – idade do pavimento desde a construção, reabilitação ou reconstrução, em anos.

d) Progressão de irregularidade:

$\Delta QI_d = 13K_{gp}[134 \times EMT(SNCK + 1)^{-5,0} \text{ x } YE4 + 0{,}114(RDS_b - RDS_a) + 0{,}0066\Delta CRX_d + 0{,}42\Delta APOT_d] + 0{,}023K_{gp} \times QI_a$ (2.63)

sendo:

ΔQI_d – aumento previsto na irregularidade durante o ano de análise, provocado pela deterioração, em contagem/km;

K_{gp} – fator de deterioração para progressão da irregularidade;

K_{ge} – fator de deterioração relativo ao ambiente;

$EMT = \exp(0{,}023\ K_{ge} \times AGE3)$;

AGE3 – idade do pavimento desde a construção, reabilitação ou reconstrução, em anos;

YE4 – número equivalente de operações do eixo padrão de 80 kN para o ano de análise, calculada pelo método da AASHTO, em milhões por faixa;

RDS_b e RDS_a – variação do desvio padrão da profundidade média da deformação permanente (em ambas as trilhas de roda) durante o ano de análise, em mm;

ΔCRX_d – variação prevista do trincamento, devido à deterioração durante o ano de análise, em porcentagem;

$\Delta APOT_d$ – variação prevista da área de panelas devido à deterioração, durante o ano de análise, em porcentagem;

QI_a – quociente de irregularidade do pavimento no início no ano de análise, em contagens/km;

SNCK – número estrutural modificado, ajustado ao efeito do trincamento, dado por:

$$SNCK = \text{máx}(1{,}5;\ SNC - \Delta SNK)$$

ΔSNK – redução estimada no número estrutural devido ao trincamento do revestimento, dada por:

$$\Delta SNK = 0{,}0000758(CRX'_a \times HSNEW + ECR \times HSOLD)$$

$$CRX'_a = \min(63; CRX_a)$$

CRX_a – área de trincamento, em porcentagem;

HSNEW – espessura do revestimento, em mm;

ECR – trincamento previsto além da quantidade que existia no antigo revestimento, isto é, em pavimentos reabilitados;

$ECR = máx[mín(CRX_a - PCRX;40);0]$

PCRX – trincamento nas antigas camadas de revestimento e base, em porcentagem, dado por:

$PCRX = 0,62PCRA + 0,39PCRW$

PCRA – trincamento total ocorrido antes da última reabilitação, %;

PCRW – trincas de classe 2 e 3 ocorridas antes da última reabilitação, %;

HSOLD – espessura total do revestimento antigo, mm.

Modelos de irregularidade longitudinal do HDM 4

Os modelos de previsão de desempenho da irregularidade longitudinal desenvolvidos para o programa HDM-4 constam no Manual do Usuário do programa HDM-4 contido no CD-ROM de instalação. Alguns são a seguir apresentados:

a) Componente da irregularidade devido ao trincamento:

$$\Delta RI_c = a_0 \Delta ACRA \quad (2.64)$$

onde:

ΔRIc – acréscimo na irregularidade longitudinal devido ao trincamento durante o ano de análise (IRI m/km).

ΔACRA – acréscimo na superfície total trincada durante o ano de análise (% total trincada da pista).

b) Componente da irregularidade longitudinal devido ao afundamento de trilha de roda:

$$\Delta RI_r = a_0 \, \Delta RDS \quad (2.65)$$

onde:

ΔRI_r – acréscimo na irregularidade longitudinal devido ao afundamento de trilha de roda durante o ano de análise (IRI m/km);

ΔRDS – acréscimo no desvio padrão do afundamento de trilha de roda durante o ano de análise.

c) Componente da irregularidade longitudinal devido a fatores ambientais:

$$\Delta RI_e = m \, K_{gm} \, RI_a \quad (2.66)$$

onde:

ΔRI_e – acréscimo na irregularidade longitudinal devido a fatores ambientais durante o ano de análise (IRI m/km);

RI_a – irregularidade longitudinal no início do ano da análise (IRI m/km);

m – coeficiente ambiental;

K_{gm} – fator de ajuste para o coeficiente ambiental.

Os modelos de previsão de desempenho do HDM, o Linear e o Bilinear, após trabalhos de recapeamento em concreto asfáltico, para irregularidade longitudinal, foram utilizados por LERCH (2002). Na Figura 2.34 é apresentado o esquema gráfico destes modelos. Verifica-se que o modelo linear é obtido fazendo-se $a_0=a_2$ e $a_1=0$. As equações são as seguintes:

$$\Delta RI = MAX\{0; a_1[MIN (a_2; RI_{bw}) – a_0] + a_3 \, MAX [0; (RI_{bw} – a2)]\} \quad (2.67)$$

$$RI_{bw} = MAX (1,0; RI_{ap}) \quad (2.68)$$

$$RI_{aw} = RI_{bw} - \Delta RI \quad (2.69)$$

onde:

ΔRI – redução na irregularidade longitudinal após recapeamento (IRI m/km)

RI_{bw} – irregularidade longitudinal antes do recapeamento (IRI m/km)

RI_{aw} – irregularidade longitudinal após recapeamento (IRI m/km)

RI_a – irregularidade longitudinal após trabalhos preparatórios para recapeamento (IRI m/km)

a_0 ao a_3 parâmetros definidos pelo usuário.

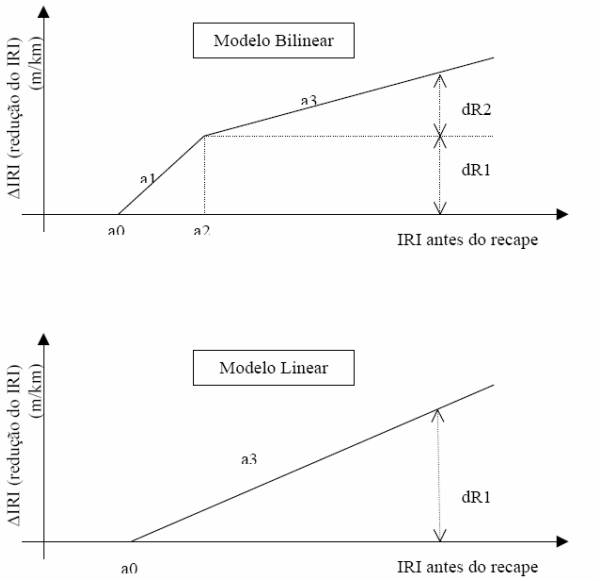


Figura 2.34 Esquema dos modelos Bilinear e Linear do modelo HDM 4 (LERCH, 2002)

CAPÍTULO 3

ASPECTOS GERAIS E AMBIENTAIS DO ESTADO DO CEARÁ

3.1 Considerações iniciais

A carta geológica e a geomorfologia do Estado do Ceará enfocando aspectos ligados à geologia ambiental, IPLANCE (1997), foi confeccionada a partir de referências bibliográficas, tais como: AB'SÁBER (1969); MOREIRA (1973); LAWRENSE (1973); MINISTÉRIO DA AGRICULTURA/SUDENE (1973); NIMER (1977); DOWN e STOCKS (1977); GOGUEL (1980); SILVA (1985); CASTRO (1985). Na elaboração da carta, foi também utilizada foto-interpretação e visitas de inspeções técnicas em nível de reconhecimento. De forma preliminar, foram avaliados os problemas que o homem passa a enfrentar, ao fazer uso do solo e os efeitos advindos da reação do solo a este uso. Sob este enfoque, foram abordados os principais fenômenos de risco e as áreas em processo de degradações ambientais, e também enfatizados os depósitos minerais e as principais jazidas do Estado do Ceará.

O Estado do Ceará tem a seguinte posição geográfica (IPLANCE, 1997):

Linhas extremas:

- Latitude: Extremo Norte: 2º 46' (Ponta de Jericoacoara)

  Extremo Sul: 7º 52' (BR-116 – Penaforte)

- Longitude: Extremo Leste: 37º 14' (Praia de Manibú-Timbáu-Icapuí).

  Extremo Oeste: 41º 24' (Área de litígio CE/PI – Serra da Ibiapaba).

Distância entre as linhas extremas:

- Distância Angular: Direção N – S: 5º 05'

  Direção E – O: 4º 09'

- Distância Linear: Direção N – S: 463 km

  Direção E – O: 564 km

Extensão Litorânea: 573 km ou 2,48% do Litoral Brasileiro

Área total do Estado: 148.016 km^2 (com a massa d'água).

3.2 Aspectos Pluviométricos, de Clima e Condições Ambientais

O clima, as condições ambientais e a pluviosidade são fatores atuantes no estado dos materiais influenciando diretamente no dimensionamento do pavimento e por conseqüência no seu desempenho. BRANDÃO (1998) atribui ao clima a principal responsabilidade por grande parte dos processos naturais que ocorrem em uma região. As características do relevo, do solo, da vegetação, dos recursos hídricos e dos animais, são diretamente afetadas pelas condições climáticas e atmosféricas. Os baixos índices de nebulosidade, ventos alísios vindos do leste, forte insolação e altas taxas de evaporação, são fatores de influência nas condições climáticas.

MOTTA (1991) faz uma distinção entre tempo e clima e, por conseguinte entre meteorologia e climatologia. A divisão das regiões climáticas da terra é assim citada: Tropicais, Temperada e Fria ou polar. As características climáticas são classificadas tendo como base (IBGE, 1977; NIMER, 1979), em função da temperatura média do mês mais frio (TM) em ºC e da pluviosidade (P) em milímetros. As classificações estão reproduzidas nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 Classificação do clima quanto à temperatura média, TM, (NIMER, 1979)

TM ≥ 18 ° C	Clima quente
15 ° C ≤ TM < 18 ° C	Subquente
10 ° C ≤ TM < 15 ° C	Mesotérmico Brando
0 ° C < TM < 10 ° C	Mesotérmico Médio

A variação da temperatura tem influência na rigidez dos revestimentos asfálticos e na deformabilidade dos pavimentos, ou seja, há uma grande dependência do pavimento com os fatores climáticos.

Tabela 3.2 Classificação do clima quanto à pluviosidade – P – (NIMER, 1979)

Super úmido	Sem seca ou com subseca
Úmido	Com 1 a 3 meses secos
Semi-úmido	Com 4 a 5 meses secos
Semi-árido	Com 6 a 10 meses secos
Desértico	Com 11 a 12 meses secos

Sendo considerado mês seco se P < 2 TM e subseco se P < 3 TM.

BERNUCCI (1995) destaca a consideração da temperatura na previsão da possibilidade de perdas de umidade dos materiais durante os serviços de compactação e mesmo depois de compactados e também no comportamento das misturas betuminosas.

MEDINA (1997) ressalta a importância da ação do clima nas rodovias, elencando em vários itens a influência da precipitação atmosférica e da radiação solar no desempenho dos pavimentos, no subleito e na estrutura.

3.2.1 Considerações Climáticas da Região Nordeste

Na classificação climática de Koppen (DNER, 1976), o clima do nordeste do Brasil é classificado como Aw (savana tropical quente, com estação seca prolongada) e Bsh, (semi-árido, quente e úmido), caracterizando-se como uma região tropical. Esta classificação não utiliza dados de evaporação e evapotranspiração, considerando apenas os elementos básicos: a temperatura e a precipitação. A umidade do clima, dado importante no estudo dos solos e estrutura do pavimento, é tratada indiretamente, através dos totais de chuva do mês mais seco.

O início da quadra chuvosa é proveniente da ação do sistema Equatorial Amazônico, definindo o regime de verão no nordeste, com chuvas dispersas e baixos índices (<100 mm). A ação conjunta deste sistema e a Convergência Intertropical, atingem índices máximos de precipitações pluviométricas no período compreendido pelo final do verão e princípio do outono. Os deslocamentos da Frente Polar Atlântica, que ao ser impelida em direção ao Equador, forçam a penetração do ar frio sob o ar tropical quente, provocando a formação de densas nuvens ao se elevar, ocasionam as chuvas do sistema de Convergência Intertropical. Durante o outono, a região continua sob a influência do regime estabelecido pela zona de Convergência Intertropical, devido à expansão do Equatorial Amazônico que ocorre no final do verão. A Frente Polar Atlântica avança, permanecendo até o final do inverno. As baixas precipitações ocasionadas nesta época são devidas à chegada deste sistema no nordeste, pelo litoral, onde o ar frio polar força a elevação do ar quente (BEZERRA et al., 1997).

MEDINA (1997) cita o trabalho dos cientistas Toledo Rizzini e Maia Pinto, onde é representada a classificação climático-vegetacional do Brasil. Nesta classificação, o nordeste é classificado como Seco-Semi-Árido e com índice de umidade (Im) variando de 0 a -40.

O Im expressa o balanço hídrico anual que por sua vez é medido mês a mês para indicar as necessidades hídricas das plantas e a quantidade das chuvas que caem em uma determinada área e se no solo, há excesso, déficit, recarga do lençol freático ou utilização das reservas do solo. Pelo critério de Thornthwaite, o Im é definido pela equação 3.1:

$$Im = \frac{100\,exc - 60\,def}{EP} \qquad 3.1$$

onde:

- exc (excesso hídrico) – é o excedente anual de água que o solo não absorve, que escoa na superfície ou infiltra-se formando a rede de drenagem ou incorpora-se ao lençol de água subterrâneo, (exc = P – EP);
- def (deficiência hídrica) – é o déficit anual de água que impossibilita o desenvolvimento normal da vegetação, (def = EP – ER);
- EP (evapotranspiração potencial anual) – quantidade de água que seria perdida por meio de uma superfície coberta de vegetação, em havendo permanentemente no solo, água em quantidade suficiente para a vegetação;
- P (precipitação ou pluviosidade) – quantidade de água adicionada ao solo de forma natural pelas chuvas ou artificialmente por irrigação;
- ER (evapotranspiração real) – parte da água que retorna à atmosfera através da transpiração dos vegetais.

Os climas podem ser definidos pelo Im da seguinte forma:

$Im \geq 100 \rightarrow$ permanentemente úmido;

$20 \leq Im < 100 \rightarrow$ úmido ou subúmido;

$0 \leq Im < 20 \rightarrow$ seco;

$-40 \leq Im < 0 \rightarrow$ semi-árido, árido.

A título ilustrativo na Figura 3.1, reproduzida de MEDINA (1997), é apresentado o balanço hídrico de seis cidades brasileiras, com os respectivos índices de umidade calculados a partir das Normas Climatológicas de 1960-1990, destacando-se a cidade de Iguatú, localizada na região nordeste, no Ceará, que apresenta o Im = -33, valor que a classifica como semi-árida.

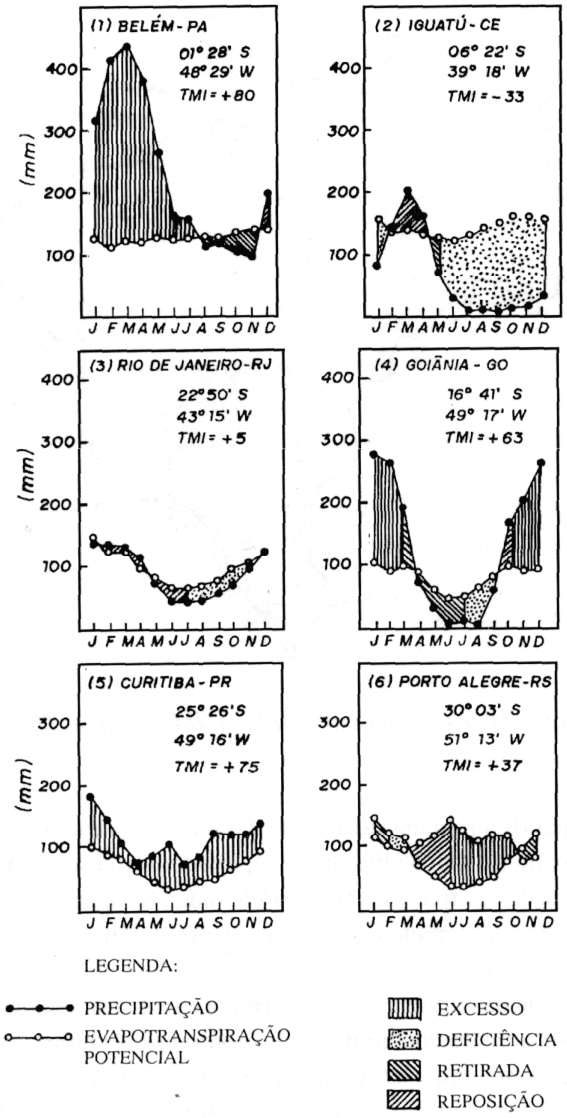


Figura 3.1 Exemplo de balanço hídrico de cidades brasileiras (MEDINA, 1997)

A pluviosidade e a evapotranspiração são os fatores fundamentais que determinam a variação do teor de umidade de equilíbrio do subleito. O teor de umidade é definido por MEDINA (1988) como sendo "o valor médio da gama de variação do teor de umidade do solo do subleito ao longo do ano, após a fase de acomodação dos primeiros meses de serviço". A experiência brasileira em rodovias federais e estaduais com condições de drenagem eficientes indica que o teor de umidade de equilíbrio do subleito é no máximo igual ao teor de umidade ótimo do ensaio normal de compactação, segundo o citado autor.

As precipitações médias da região Nordeste variam de 1200 a 1600 mm (COLARES, 1996; BRANDÃO, 1998), podendo atingir valores inferiores a 500 mm e superiores a 2000 mm, em pontos isolados da região (MOTTA, 1991). A distribuição anual muito concentrada em poucos meses, é o ponto mais crítico da região, resultando na existência de períodos secos de longa duração e estações muito chuvosas (MOTTA, 1991).

Elevadas temperaturas, baixos índices de nebulosidade, pequena amplitude térmica, forte insolação, altas taxas de evaporação, são condições a que estão sujeitas às regiões de clima semi-árido, como o da região Nordeste. A temperatura média da região oscila entre 26 e 28 °C (COLARES, 1996).

3.3 Aspectos Geológicos do Estado do Ceará (IPLANCE, 1997)

3.3.1 Fenômenos de risco e áreas em processo de degradação

- **Áreas fossilíferas de interesse científico e cultural**

  Correspondem aos museus geológicos naturais do sul do Estado, representados por macro e micro fósseis em diversos níveis das Formações que integram a bacia sedimentar do Araripe.

- **Áreas de impacto da atividade minerária**

  Diante das condições climáticas e geológicas e da pouca variedade de bens minerais produzidos no Estado, é destacada à atividade minerária de materiais primários da construção civil, por estarem nas proximidades de núcleos urbanos, a sua exploração e o seu beneficiamento.

- **Áreas de acumulação**

  Fenômenos localizados na região litorânea onde predominam fortes ventos ocasionando a migração das dunas e afetando áreas cultiváveis.

- **Erosão acelerada (antrópica)**

  Alteração no perfil da paisagem natural ocasionada pelo intenso processo de urbanização da região metropolitana de Fortaleza com a expansão industrial, construção do porto, atividade mineraria, etc.

- **Taludes de escavação sujeitos aos desmoronamentos e áreas de riscos**

  Ocorrência de uma nova rede de drenagem de escoamento superficial, devido às construções de rodovias. As elevações e rebaixamentos das superfícies provocados por aterros e escavações, ocasionam distúrbios na estabilidade dos terrenos como os desmoronamentos, onde o intemperismo atua nas áreas de fraqueza da rocha e por gravidade se dão os deslocamentos.

- **Pedreiras**

  Áreas em permanente conflito com os processos de urbanização. A recolocação dessa atividade faz-se necessária, através de um zoneamento que delimite essas áreas.

- **Área sujeita as inundações**

  Tem como causas principais a interferência do homem, através de aterros e desmatamentos e a alta concentração das precipitações em um curto espaço de tempo, aliado ao pequeno gradiente dos cursos d'água.

- **Desertificação**

  A Gênese desse processo é bastante variável, incluindo fatos ligados a uma pré-disposição da estrutura geo-ecológica e à ação antrópica. O sistema de desertificação possui tendências próprias, tais como: perdas das propriedades físicas e químicas do solo, freqüência maior dos redemoinhos, aumento no fluxo de escoamento das águas durante a estação chuvosa, diminuição da quantidade e qualidade dos recursos hídricos e aumento de áreas abandonadas (mineração, agricultura) etc.

- **Impactos hidrogeológicos e ecológicos de reservatórios**

  Os grandes reservatórios do Estado foram construídos em áreas bem próximas a grandes falhamentos. Independentes de sua localização e dos efeitos positivos em relação aos aspectos sócio-econômicos são enumeradas as principais modificações causadas por suas construções: mudanças no processo deposicional do rio, destruição das feições naturais pelas águas do lago artificial, elevação do lençol freático e impacto na flora e fauna.

3.3.2 Unidades Geológicas do Estado do Ceará

- **Pré-Cambriano**

São compostas essencialmente por quartzitos e gnaisses. O Pré-Cambriano engloba no Estado do Ceará diversas unidades litoestratigrágicas, composta por rochas do embasamento cristalino, a saber: gnaisses, xistos, filitos, anfibolitos, etc. A localização destas rochas distribui-se fisiograficamente em zonas emersa e submersa.

Pré-Cambriano Superior

A litologia predominante está representada por diversas amostras que constituem um granito com granulação que oscila de média a grosseira, com tons variando de róseo-claro a avermelhado. Na Figura 3.2 é mostrado o mapa geológico do Estado do Ceará (IPLANCE, 1997).

- **Paleozóico**

A bacia do Parnaíba é paleozóica, apesar de que depósitos mesozóicos, pouco espessos, cubram grandes áreas. A formação Serra Grande ocupa uma faixa com direção geral Norte-Sul, apresentando exposições de arenitos, formando escarpas abruptas em discordância angular, sobre o embasamento cristalino aplainado.

- **Mesozóico**

A Bacia do Araripe abrange parte dos Estados do Piauí, Pernambuco e Ceará, tendo sua maior extensão neste último. Morfologicamente apresenta-se como uma mesa alongada, sustentada pela Formação Exu. As camadas superiores apresentam-se subhorizontais e suavemente inclinadas para o norte e nordeste.

A Bacia Sedimentar Potiguar situa-se no Nordeste brasileiro, ocupando parte do Estado do Ceará e Rio Grande do Norte. A forma geométrica geral da seqüência sedimentar é a de uma cunha que se espessa para o norte em direção ao mar, atingindo espessuras superiores a 1.000 metros. No continente, seu eixo maior segue uma direção leste-oeste, com aproximadamente 320 km e largura variando entre 45 e 140 km, perfazendo cerca de 21.500 km².

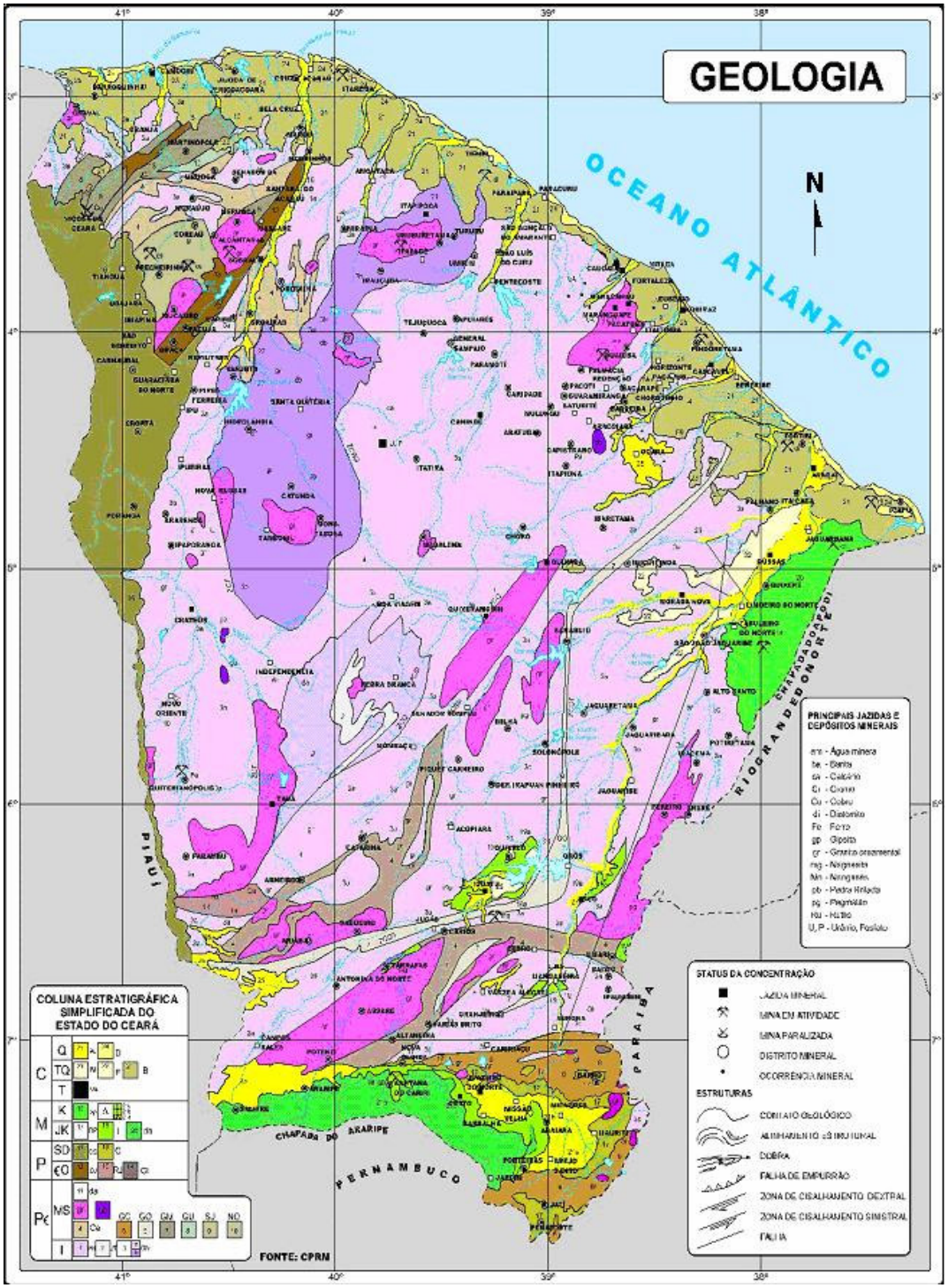


Figura 3.2 Mapa geológico do Estado do Ceará (IPLANCE, 1997)

A Formação Açu é constituída por um pacote sedimentar basal da Bacia Potiguar, ocorrendo numa faixa circundando a bacia entre o embasamento cristalino e a base da escarpa que delimita seu contato com a Formação

Jandaíra. A parte aflorante é caracterizada por arenitos brancos e avermelhados, de granulação média a grosseira.

A Formação Jandaíra ocorre em uma vasta área com direção geral leste-oeste. Em sua porção ocidental, forma uma extensa chapada com mergulho para o norte e para o nordeste. A seqüência sedimentar é discordantemente recoberta por sedimentação do Grupo Barreira ou por sedimentação mais recente, formando no conjunto, um extenso platô. Litologicamente é composta por calcários bioclásticos, calcarenitos e calcários dolomíticos.

A Bacia do Iguatú-Icó apresenta um comportamento estrutural análogo às demais pequenas bacias cretáceas do Nordeste brasileiro. Originaram-se em depressões tectônicas preexistentes do embasamento, seguido de subsidência durante a fase de sedimentação.

- **Cenozóico**

A Formação Barreiras é litologicamente constituída por sedimentos areno-argilosos, algumas vezes litificados, com uma coloração avermelhada, creme ou amarelada, muitas vezes com horizontes de aspecto mosqueado. Possui geralmente grãos mal selecionados e subarredondados, com granulação variando de fina a média. Normalmente ocorre formando tabuleiros ao longo do litoral, apresentando suaves inclinações para o mar. O Grupo Barreira expõe-se por toda a faixa costeira recobrindo até 50 km no continente. As coberturas têm espessuras variadas, podendo atingir até 25 metros, e, morfologicamente, apresentam-se como capeamento de platô, sendo encontrado nos mais diferentes níveis altimétricos (CHAVES, 2000).

As Paleodunas são sedimentos quaternários formados pela ação dos ventos alísios e atualmente fixados por vegetação. A drenagem é geralmente concordante e controlada pelas reentrâncias e cristas alongadas, sendo comuns as lagoas de saturação e lagunas contendo depósitos de diatomitas.

As dunas móveis são sedimentos eólicos bem distintos em imagem de radar, fotografias aéreas, etc., devido à tonalidade clara causada pela ausência de vegetação e carência de umidade. Estão intimamente relacionadas com a linha de costa atual, formando extensos cordões paralelos à praia. Do ponto de vista ambiental, essas regiões são bastante vulneráveis à ação do homem.

3.4 Aspectos Geomorfológicos do Estado do Ceará

A geomorfologia do Estado do Ceará comporta características decorrentes de uma convergência de fatores de onde se destacam as condições geológico-estruturais, paleoclimáticas, eustáticas e a morfodinâmica atual. Com o propósito de fornecer uma visão global a respeito da geomorfologia cearense, foram considerados os aspectos que atendem às finalidades de um estudo em nível de reconhecimento. Sob tal ponto de vista, foram abordados também em seus traços mais significativos, aqueles aspectos que detém uma relação mais estreita com o relevo.

3.4.1 Fundamentos Geológicos do Relevo

Os fatores estruturais têm papel dos mais importantes quando se trata da análise da geomorfologia do Ceará. Os estudos das Folhas de Jaguaribe e de Fortaleza evidenciam a extrema complexidade geológica de que é dotado o território cearense. Incluem-se neste território os terrenos pertencentes ao Pré-Cambriano, bem como as áreas de cobertura sedimentares paleo-mesozóicas e depósitos recentes.

As unidades morfo-estruturais representam setores das macro-estruturas definidas em nível dos escudos e das bacias sedimentares. Os relevos característicos dos escudos ou dos núcleos cratônicos compreendem as áreas de estabilidade da plataforma, onde a razão erosiva tende a se manifestar com maior rigor pelas fraquezas associadas a fraturas e juntas condicionadas pela tectônica ruptural ou por alívio de pressão.

3.5 Aspectos Pedológicos do Estado Ceará

A classificação técnica ou interpretativa dos aspectos pedológicos consiste da previsão do comportamento dos solos sob manejos específicos e sob certas condições ambientais. É baseada em interpretação de estudos básicos (levantamentos taxonômicos) de solos. Trabalhos executados pela FUNCEME, 2000, cobriram as três principais classificações interpretativas, que são: Capacidade de Uso do Solo, Aptidão Agrícola das Terras e Classificação de Terras para Irrigação

Capacidade de Uso do Solo

Sistema desenvolvido, originalmente, pelo Serviço Nacional de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Relaciona-se com aspectos de conservação de solos, onde as potencialidades destes são analisadas com maior ênfase em suas limitações. Considera

que o nível de manejo deve ser médio ou alto e é recomendado para locais que possuem levantamento pedológico detalhado ou semidetalhado (IPLANCE, 1997).

Aptidão Agrícola das Terras

No desenvolvimento da aptidão agrícola das terras, fundamentada no seu melhor uso, são considerados três níveis de manejo e quatro classes de aptidão. É recomendado para locais onde se necessita de um planejamento agrícola regional e trabalhos de zoneamento agrícola, assim como para locais que possuam estudos de solos em níveis generalizados, de reconhecimentos ou exploratórios (IPLANCE, 1997).

Classificação de Terras para Irrigação

Esta classificação técnica é feita, primordialmente, para a obtenção de informações necessárias à delimitação de terras em áreas de classes aptas para a irrigação, eliminando as áreas inaptas, nas condições econômicas prevalecentes. Necessita da análise e avaliação de suas características físicas e químicas, incluindo as características do solo e os aspectos topográficos e de drenagem, além de um grande volume de dados adicionais relativos à agronomia, economia e engenharia. Exigem-se para o seu uso, levantamentos pedológicos semidetalhados ou, preferencialmente, detalhados, principalmente se for área de várzea (IPLANCE. 1997).

No entendimento da questão relativa aos solos de interesse agrícola, parte deste problema é associada à dificuldade na identificação destes solos, com repercussão direta na definição de sua vocação, do manejo e da orientação à conservação/preservação ambiental. Na região do Nordeste, a complexidade geológica com predomínio de embasamento cristalino, a significativa variação no modelado do terreno, associados a um ambiente, tipicamente, semi-árido, resultou em grande heterogeneidade e complexidade no arranjamento e variação dos solos.

As classes pedológicas predominantes no território do Estado do Ceará são (IPLANCE, 1997): Latossolo Vermelho, Podzólico Vermelho-Amarelo, Planossolos Solódicos e Litólicos Eutróficos e Distróficos

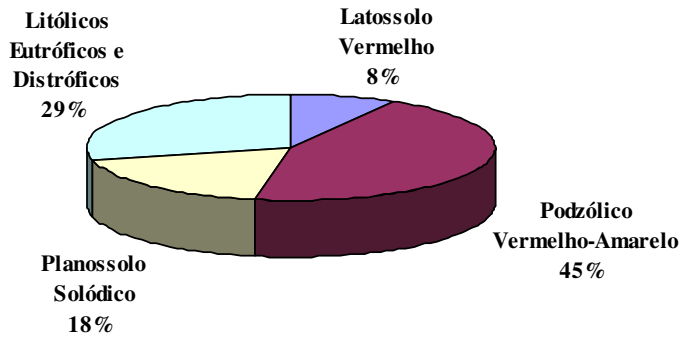
A Tabela 3.3 apresenta os solos predominantes no Estado do Ceará e as respectivas porcentagens em função das áreas. Na Figura 3.3 está ilustrado por um gráfico as respectivas porcentagens destes solos. Há, portanto, abundância de materiais adequados a princípio para pavimentação, visto que a classificação MCT (BARROSO, 2004),

indica latossolos e podzólicos como classes prováveis de solos lateríticos. Os planossolos são em geral areias e os litólicos são rocha aflorando.

Tabela 3.3 Predominância de Solos do Estado do Ceará

PRINCIPAIS CLASSES	ÁREA (km^2)	% SOBRE O ESTADO
Latossolo Vermelho	8.168	8
Podzólico Vermelho-Amarelo	43.577	45
Planossolo Solódico	17.977	18
Litólicos Eutróficos e Distróficos	28.239	29

Fonte: MA-MINTER/SUDENE.



Fonte: MA-MINTER/SUDENE.

Figura 3.3 Predominância de Solos do Estado do Ceará

3.6 Distribuição das Precipitações

Análise dos dados pluviométricos mostra que as precipitações mais significativas e melhor distribuídas ocorrem no litoral e nas serras, enquanto que a maior irregularidade e a maior escassez verificam-se nos sertões. Na Figura 3.4 é apresentado o Mapa da Precipitação Média Anual do Estado do Ceará (IPLANCE, 1997).

À medida que se penetra para o interior do Estado, as precipitações declinam, excetuando-se algumas manchas de isoietas mais elevadas, decorrentes naturalmente, de

fatores locais: influência orográfica, como é o caso da região do Cariri e Serra do Pereiro.

Os municípios que se destacaram, no decorrer dos anos considerados no estudo (1953 a 1983), com maior índice de chuvas em mm, foram: São Benedito com 2063, Ibiapaba com 1745, Aratuba com 1728 e Ubajara com 1441, todos localizados em uma faixa hipsométrica de 800 a 1.000 m.

Os municípios que se caracterizaram pela escassez de precipitações em mm, foram: Parambu com 533, Independência com 599, Tauá com 595, localizados na posição mais ocidental do Estado e Irauçuba com 518 mm anuais, situado no Sertão Centro Norte. Neste último caso, a localização geográfica a sotavento da Serra de Uruburetama, é responsável por esta escassez da pluviosidade local.

Como são constatados nos totais anuais do período, as isoietas representativas dos maiores índices de pluviometria localizam-se nas serras, mantendo um regime de precipitação melhor distribuído, de dezembro a junho, detendo, portanto, o mais curto período seco de todo o Estado. Isto, em decorrência da altitude e da orientação do relevo, face à exposição dos ventos úmidos marítimos, como é o caso da Serra de Baturité e Leste da Ibiapaba. Nos níveis mais elevados das serras, geralmente, não chega a ocorrer um mês seco, demonstrando a melhor distribuição das chuvas.

No litoral cearense, a distribuição espacial das precipitações ocorre de modo bastante significativo, atingindo seus valores máximos nos meses de março a abril, com isoietas de 1.000 a 1.250mm anuais, que penetram pelo Maciço de Baturité, Uruburetama, Meruoca e Serra da Ibiapaba.

O período de estação chuvosa no litoral tem, geralmente, a mesma duração do período seco, este último, porém, sendo alterado por precipitações esparsas, contribuindo para a permanência da umidade do solo durante quase todo o ano. A Tabela 3.4 apresenta a distribuição pluviométrica do Estado do Ceará.

Nos últimos anos foram desenvolvidos estudos voltados para a nucleação artificial, técnica que acelera o processo de precipitação, contribuindo significativamente para amenizar a escassez de água em alguns municípios do Estado. As chuvas no Ceará assumem um papel de grande importância não somente do ponto de vista climático, como também, pelas alterações no quadro econômico, social e ecológico do Estado.

Por outro lado, sob o ponto de vista de pavimentação a falta de chuva contribui para o bom desempenho dos pavimentos e para a umidade de equilíbrio baixa.

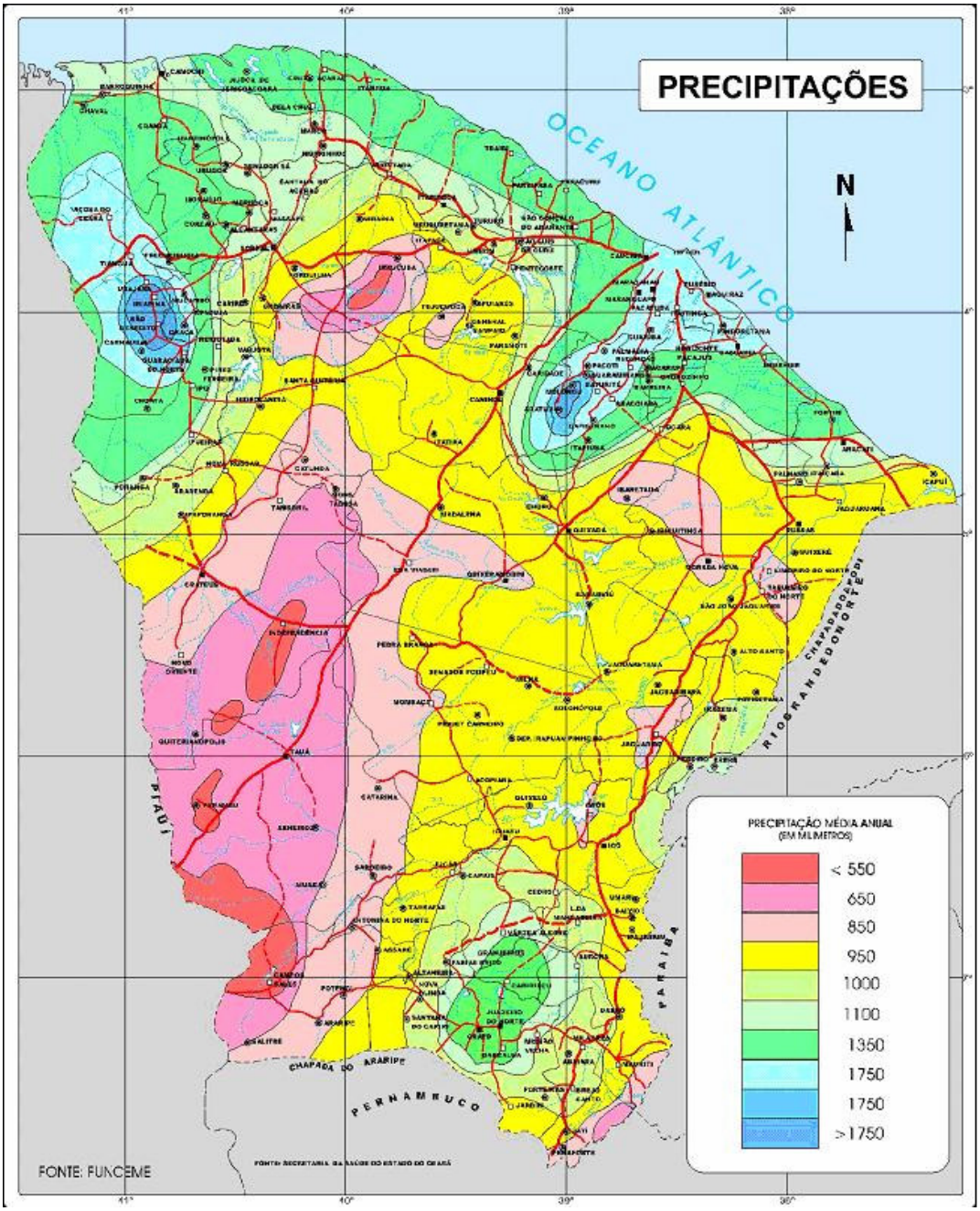


Figura 3.4 Mapa da Precipitação Média Anual do Estado do Ceará (IPLANCE, 1997)

Tabela 3.4 Distribuição Pluviométrica do Estado do Ceará (IPLANCE, 1997)

	Município	Mínima	Ano	Máxima	Ano	Média do Período
Litoral	Fortaleza	804,0	1956	2.751,0	1974	1.533,50
	Acaraú	736,2	1970	2.501,7	1963	1.285,71
	S. G. Amarante	351,0	1968	2.196,9	1974	1.060,92
Serra	S. Benedito	1.087,0	1966	5.641,7	1963	2.062,86
	Mulungu	868,0	1958	2.007,1	1964	1.109,20
	Pacoti	849,3	1966	2.113,8	1977	1.529,90
Sertão	Independência	181,7	1970	1.237,2	1974	550,50
	Parambu	198,6	1958	1.060,2	1974	532,60
	Catarina	340,8	1958	1.657,5	1974	678,02

3.7 Aspectos Litológicos da Paisagem Cearense

Na literatura é enfatizado o importante modelo de erosão diferencial na paisagem da área do Estado do Ceará com enfoque sobre a Região Metropolitana de Fortaleza, apesar dos numerosos fatores de incerteza provenientes das formas de relevo residuais tectônicas. Entretanto, os dados da avaliação litológica permitem a obtenção de numerosos parâmetros relacionados com a resistência das rochas afetadas pela erosão (IPLANCE, 1997).

As unidades litológicas apresentadas no mapa de litologia, Figura 3.5, são compostas por sedimentos arenosos e argilosos da planície quaternária e tabuleiros, sedimentos terciários de formação barreiras e os solos residuais provenientes da alteração das rochas cristalinas da região serrana e colinosa. Várias formas de relevo de erosão diferencial apresentam-se nas regiões interiores, no próprio subsolo e nas interfaces entre este e as camadas sedimentares em locais onde os domínios tectônicos diretos nas formas geográficas de relevo podem ser excluídos (seções terraplanadas ou superfícies estruturais, por exemplo).

Os domínios litológicos são definidos menos claramente nos contornos dos principais volumes montanhosos, proporcionando uma visão geral dos aspectos pedológicos da área Sertaneja, já que eles coincidem somente pontualmente com interfaces litológicas. Seus significados permanecem ambíguos por causa dos inúmeros casos de desprendimentos contínuos em linhas de falhas possivelmente reativadas no período

Cretáceo ou depois. Apesar dessas limitações, algumas séries de observações gerais são feitas a seguir.

Nas áreas de subsolo levantadas, o tipo mais freqüente de erosões incidentes corresponde a cortes e alargamentos de depressões ao longo das linhas de falha e zonas desgastadas. Isto pode ser observado em todos os domínios geológicos que formam a província do Borborema e ao longo das zonas de falhas que separam tais domínios.

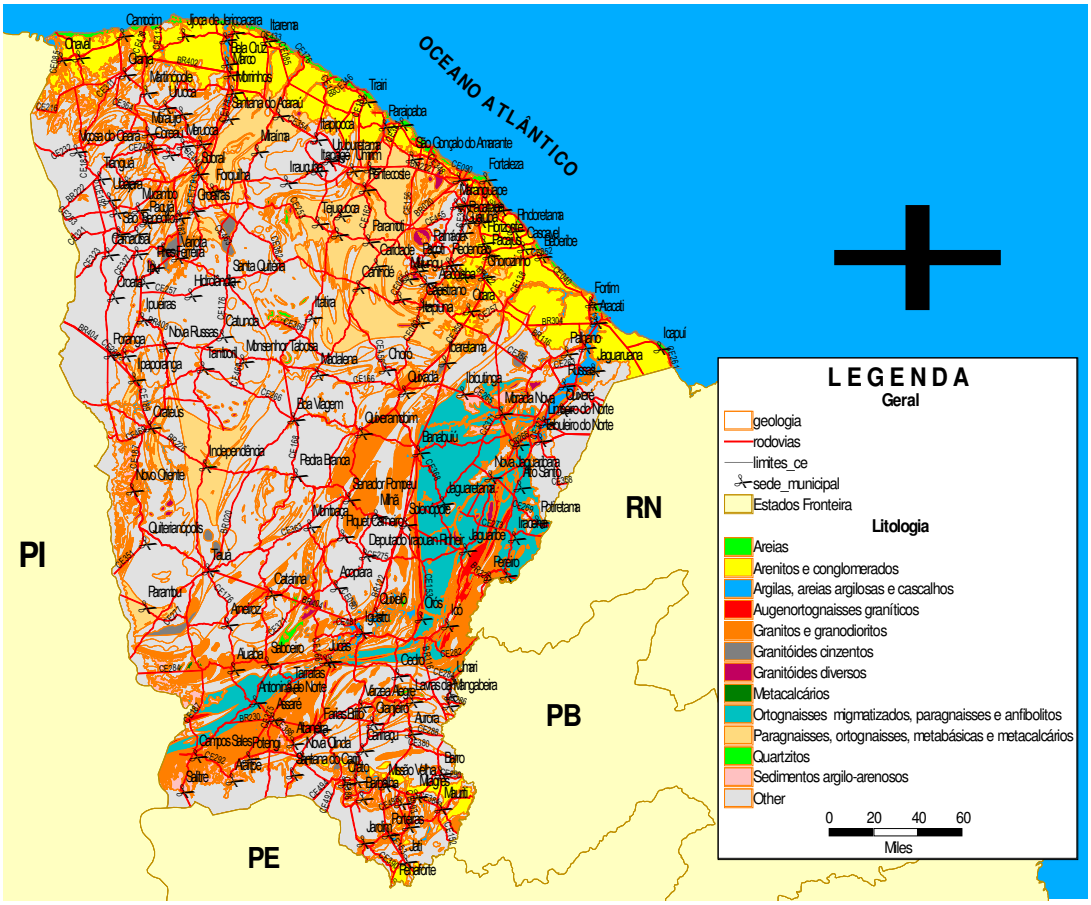


Figura 3.5 Litologia do Estado Ceará × Rodovias (adaptada de IPLANCE 1997 e DERT, 2003)

A variabilidade petrológica do subsolo é também freqüentemente refletida na paisagem. Vários contatos entre intrusões Brasilianas inferiores e posteriores e rochas metamórficas apresentam com relativa freqüência, mas não sistematicamente, o contorno de inselbergs, elevações e alargados platôs. As cores graníticas de mantos magmáticos do domínio central do Ceará formam alguns dos acidentes geográficos mais elevados, montanhas do Norte de Baturité e de Irauçuba (BRANDÃO, 1998).

O nível mais elevado e recente, ou intrusões post-orogênicas, classicamente consideradas como mais resistentes por terem sofrido menos efeitos tectônicos do que antigas intrusões e rochas presentes, formam mais sistematicamente acidentes geográficos enormes e pediplanações e resíduos subseqüentes (Serra das Matas, Serra Azul) ou grandes inselbergs (Serra da Barriga). Nas imediações de Quixadá, dados petrográficos mais detalhados indicam as características básicas da composição mineralógica. O complexo granítico Quixadá-Quixeramobim é parcialmente truncado pela área Sertaneja. No complexo Calcário-Alcalino, espetaculares inselbergs e outras formas de relevo estão consideravelmente conservadas nas faces leucocráticas de uma recente classe de orogênicos.

A expressão geomorfológica das intrusões de Meruoca e Mucambo é mais ambígua, devido ao provável comportamento tectônico recente ao longo de uma das linhas de falha (a falha Café-Ipueiras) que formam os seus limites. Além disso, o contraste morfológico entre essas duas intrusões co-originárias pode ser explicado por cada das depressões da irregular superfície que outrora as chanfrou antes de seu soterramento e exumação final, ou pelas diferenças de composição ou nível de afloramento visado em estudo.Verifica-se também que intrusões posteriores estão escavadas ou aplainadas, fato este que salienta a necessidade de estudos complementares sobre a vasta abrangência dos parâmetros envolvidos na determinação da resistência diferencial à erosão apresentada por tais formas de relevo.

Intensos contrastes de resistências à atividade erosiva são também observados nas unidades metamórficas. No Sertão Central, nos domínios Orós-Jaguaribe e do Rio Piranhas bem como na região do Seridó, os subsolos magmáticos e Pré-Brasilianos mostram-se freqüentemente escavados e aplainados. Gnaisses e outros tipos de rochas metamórficas pertencentes às partes autóctones (Pedra Branca) ou a cortes aprofundados destes subsolos e de seqüências de coberturas Proteozóicas, formam com mais freqüência saliências complexas, platôs ou montanhas de maior altura (Baturité). Regiões de jazidas de quartzo e mármore desempenham um papel primordial. Faixas Sinclinais e Quartizílicas formam longas regiões com saliências residuais cujos contornos arredondados salientam as principais dobras e contatos estruturais, na área costeira ao sul de Granja ou nas pediplanações da região Sertaneja, desde Iguatu até o Rio Piranji (as elevações de Banabuiú-Orós e a Serra do Félix).

Depósitos de mármore incluídas nas camadas mais superficiais da Crosta (supracrostais) devem ser considerados por suas proeminentes e irregulares formas de relevo, ao contrário de suas fortes calcificações (vastas glaciações, grutas). Eles formam outeiros e pontais ao sul de Ibiapaba (Ubajara) e da Serra do Martins ou elevados inselbergs ao sul de Fortaleza e a leste do Maciço de Baturité.

Em várias localidades, especialmente abaixo da região Paleozóica, depressões intemperizadas de outras rochas metamórficas prepararam em grande parte a remoção seletiva de material circundante, resultando na emergência de formações marmóricas. Uma boa ilustração para tal fato é o desgaste regressivo dos taludes dos quais emergem progressivamente manifestações de desgastes oblíquos localizados.

Situações das mais complexas também podem ser verificadas. Controle litológico que têm envolvido escavações da grande depressão do Crateús tem sido decifrado somente de maneira parcial. O contraste de resistência entre as variedades de rocha do Paleozóico e seus subsolos intemperizados é um importante fator que explica sua localização e assimetria, mas outros contornos dessa depressão são controlados com menor clareza pelos contatos litológicos, exceto em elevações ricas em materiais graníticos que se apresentam ao norte.

As partes inferiores destes solos, submetidas às escavações até camadas gnáissicas, também se estendem até o leste e até o sul das regiões magmáticas e graníticas que sofreram profundos efeitos tectônicos, nas imediações da zona de corte, formando o eixo da depressão (a zona de falha de Tauá). Portanto, suspeita-se de um vasto cenário de diversidades litológicas. A complexidade de tais elementos pode ser comprovada pelo próprio aspecto das paisagens naturais da região ao norte da Chapada do Araripe. Ali, a própria geometria dos acidentes, contornos sinuosos, variações abruptas das cristas e corredores estreitos, refletem a influência da erosão diferencial ao longo de sua extensão alternando sutilmente com rígidas camadas de subsolo metamórfico de espessura dobrada. Entretanto, as maiores saliências são formadas pela exumação seletiva de extensas intrusões graníticas (nas imediações de Várzea Alegre).

As interfaces entre o subsolo e as coberturas de rochas são sistematicamente evidenciadas pela erosão diferencial, mostrando algumas das maiores inclinações periféricas do domínio Jaguaribe-Piranhas, como exemplificado pelo quadro presente em Ibiapaba e pela depressão de Crateús.

CAPÍTULO 4

O SISTEMA DE GESTÃO E DADOS DISPONÍVEIS DA MALHA VIÁRIA DO DERT-CE

4.1 Histórico do Sistema de Gestão

Em 1993, o DERT deu os primeiros passos para a implementação de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), para a malha rodoviária estadual do Ceará. Os estudos foram financiados pelo BID (Banco Interamericano de Desenvolvimento) que propôs a utilização do *software* HDM-III. Esse *software* subsidia um SGP, auxiliando a análise da viabilidade técnico-econômica de projetos.

Os trabalhos foram iniciados com a participação do Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, DET/UFC, que fez uma interface amigável no ambiente Windows do HDM - III. O programa (HDM-III) solicitava dados que o DERT não dispunha. Concomitantemente à implantação do HDM-III, em 1994, foram instaladas em algumas rodovias sob jurisdição do DERT, equipes de contadores de tráfego.

Os trabalhos prosseguiram nos anos seguintes com a seguinte cronologia:

1994 – Elaboração e execução de um projeto de pesagem, além de um outro projeto de contagem volumétrica classificável, com a localização de postos permanentes, com metodologia de expansão de coleta de dados, serviços a cargo do DET/UFC.

1994/1996 – Elaboração por empresa de consultoria de um projeto para gerência de pavimentos, sendo definidos como distritos sedes (pilotos), Aracati e Aracoiaba. Neste projeto foram efetuados todos os ensaios necessários à alimentação do banco de dados do HDM, tais como: Índice de Irregularidade Longitudinal com o equipamento Maysmeter, Deflexão com a viga Benkelman, ensaios de sondagem com trado e percussão, caracterização, levantamento de defeitos, determinação dos trechos homogêneos. Foram também definidas as unidades de amostragem em cada segmento rodoviário.

1996 – Houve a continuação dos trabalhos sendo efetuado um levantamento de campo para determinação do Índice de Irregularidade longitudinal, trincas, deflexões, etc. em toda malha viária estadual pavimentada.

1997/1998 – Foram efetuados serviços de contagem volumétrica classificatória.

1999/2000 – O DERT implantou um novo serviço de contagem de tráfego estabelecendo postos permanentes e pontuais de contagem na malha viária do Estado. Foi refeito o plano de pesagem pelo DET/UFC para o DERT e uma pesquisa de tráfego em toda malha viária do Estado por uma empresa de consultoria.

2000/2001 – A ASTEF/UFC efetuou um Estudo de Concepção e Especificação do Sistema da Pesagem de Veículos de Carga no Estado do Ceará – Operação Conjunta DERT/SEFAZ/DNER. O objetivo do trabalho foi o de dotar o DERT de um instrumento que oriente a definição e implantação de uma política de controle de peso dos veículos de carga que trafegam pelas rodovias no Ceará tendo em vista evitar a redução da vida útil destas rodovias, especificada em projeto.

Como o HDM-III era utilizado para avaliação de deterioração e não na própria gerência, a partir do ano 2000 o DERT procurou aperfeiçoar o seu sistema de gerência aliado a um planejamento de conservação rotineira. Para isso, foi contratada uma empresa de consultoria para elaborar uma nova metodologia de sistema de gestão.

2000/2002 – A empresa de consultoria efetuou levantamentos na malha estadual compreendendo: Levantamento Visual Contínuo (LVC), Deflexão e Irregularidade Longitudinal. Seguindo-se a estes levantamentos, foi implantado o atual Sistema de Gestão de Pavimentos do DERT, SGP-DERT, conhecido atualmente como SIGMA - Sistema Integrado de Gerência e Manutenção (ENGEFOTO, 2002).

Esse sistema auxilia na programação das intervenções de manutenção e de conservação (rotineiras e periódicas), além de permitir uma interface com o próprio HDM-III ou, admitindo agora com o HDM 4, podendo, ainda, alterar os parâmetros assumidos por este *software*. O objetivo é estabelecer uma política eficiente de conservação e manutenção da

malha rodoviária estadual, dimensionando as necessidades de investimento e otimizando a aplicação dos recursos disponíveis.

Nesse aspecto, as estratégias de planejamento visam auxiliar o tomador de decisão do DERT na obtenção de recursos suficientes para essas atividades. De acordo com os valores disponíveis, é elaborada uma programação destas aplicações analisando-se alternativas, com ou sem restrição orçamentária, visando alcançar resultados satisfatórios no nível de serviço das rodovias (BENEVIDES et al., 2004). O Sistema de Gestão do DERT já gerou dois relatórios relativos aos anos de 2001 e 2003.

4.2 O SGP do DERT

4.2.1 Informações gerais

O SIGMA do DERT foi concebido para atender a realidade e as especificidades da malha rodoviária estadual cearense pavimentada ou não. Por sua vez, o referido sistema trata apenas da malha pavimentada. Os procedimentos implementados permitem que o usuário configure os parâmetros e, com base na qualidade dos dados, crie modelos mais genéricos ou mais detalhados. Pode ser definido como uma ferramenta gerencial destinada a auxiliar os técnicos do DERT no planejamento e controle das ações ligadas à conservação rotineira e manutenção da malha rodoviária estadual.

O SGP-DERT é composto por três subsistemas: SIB – Sistema de Informações Básicas, SAC – Sistema de Administração da Conserva e SGP – Sistema de Gerência de Pavimentos, conforme Figura 4.1. O Sistema de Informação Básica (SIB) contém informações gerais, que são atualizadas *on-line,* sobre o estado de conservação da pista (por exemplo: presença de trincas, dimensão dessas trincas etc.), além de informações extrapista como: sinalização, faixa de domínio, dentre outras. A Figura 4.2 mostra uma tela do sistema de informação *on-line* do SIGMA/SGP-DERT*,* sobre o estado de conservação de um segmento de pista como exemplo dos campos existentes.

Figura 4.1 Informações administradas pelo SGP-DERT

Sigma
Módulos Ferramentas Janelas Ajuda
SIB-P SIB-E SGP-E SGP-P SAC-E SAC-P CONS
SIB - Banco de dados (Pistas)
Rodovia CE-040 Trecho 040ECE0090D Faixa D1 Ano 2001
SRE 040ECE0090D 040ECE0110D 040ECE0130
Situação Duplicado Duplicado Pavimentado
Gerência Adm. DERT Adm. DERT Crema
Coincid.
Marcos 000 3869 m 000 2533 m 000 5000 m
AE Acos
E2 Traf
E1 Traf
D1 Traf
D2 Traf
AD Acos
IRI (m/m)
20,0
4,0
3,0
0,0
Rodovias Trechos SRE Marcos Gerência Trechos Trechos Coincidentes Pontos Notáveis Faixas Largura Faixas Camadas Defeitos (LVC) IRI Deflexão
Rodovia Trecho Código Marco Início Marco Término Veloc. (km/h) Leitura (u/km) IRI QI Início (m) Término (m) Extensão (m)
CE-040 040ECE0090D D1 000 + 0 000 + 200 53 28 4,1 53 19.045 19.245 200
CE-040 040ECE0090D D1 000 + 200 000 + 400 67 35 4,8 62 19.245 19.445 200
CE-040 040ECE0090D D1 000 + 400 000 + 600 70 18 3,1 40 19.445 19.645 200
(A) Identificação do Trecho
(B) Vista em planta
(C) Gráfico de Barras IRI para faixa selecionada
(D) Registros resultantes dos Controles de Seleção

Figura 4.2 Tela do sistema de informação *on-line* do SGP-DERT, sobre o estado de conservação da pista

Benefícios Esperados no SGP-DERT

- Estabelecimento de uma base de dados única;
- Integração das áreas de planejamento e de operação da manutenção e da conservação;
- Fortalecimento da área de projeto rodoviário;
- Orçamentos enquadrados às limitações de recursos;
- Avaliação do estado de conservação da malha e programação da conserva rotineira com base em critérios técnicos e metodologia definida;
- Investimentos em intervenções de manutenção de acordo com escala de prioridades;
- Relatórios gerenciais consistentes capazes de orientar os tomadores de decisão.

Resultados já obtidos

- Consolidação de uma base de dados confiável, com o cadastramento de todo o Sistema Rodoviário Estadual (SRE);
- Cadastramento dos Pontos Notáveis (postos de serviços, hotéis e pousadas, pontos turísticos, monumentos, igrejas, etc);
- Elevação do nível de consciência dos gerentes da área;
- Referenciamento da malha durante o Levantamento dos Pontos Notáveis (LPN), com excelente nível de precisão, e materialização de início e fim de trechos rodoviários através da implantação dos marcos principais e secundários. Os marcos principais materializam os pontos de início e final de cada trecho do Sistema Rodoviário Estadual (SRE);
- Regularidade razoável na atualização do banco de dados;
- Sistematização do processo de programação das atividades de conserva;
- Registro da produção das equipes;
- Possibilidade de emissão de mapas temáticos os mais diversos;
- Elaboração dos planos anuais de conservação e plurianuais de manutenção.

Principais propostas de ações futuras

- Fortalecer a área de projeto rodoviário, reorganizando o setor e integrando-o ao processo de gestão;
- Fortalecer a área de planejamento, tornando-a capaz de: Elaborar os planos anuais de conserva e plurianuais de manutenção, manter atualizado o SRE e acompanhar as atividades operacionais, comparando os resultados obtidos com o planejado;
- Manter atualizado o banco de dados do Sistema;
- Fazer a avaliação econômica das intervenções;
- Avaliar os custos de circulação dos veículos;
- Monitorar o tráfego nas rodovias estaduais;
- Emitir relatórios periódicos sobre estado de conservação da malha e prioridades para intervenções de manutenção;
- Adquirir *softwares*, por exemplo: HDM-4 e Plataforma GIS;
- Desenvolver modelos de desempenho de pavimentos;
- Desenvolver um sistema dinâmico de pesquisa de tráfego;
- Desenvolver um sistema de monitoramento do transporte de cargas.

4.2.2 Composição do SGP do DERT

O sistema é composto por dois módulos subrotinas:

SGP-E - Dados de parametrização

SGP-P - Análise e resultados

As etapas de parametrização do sistema SGP-E, são a seguir, sucintamente descritas:

a) Rede de Estudo: É a composição da malha rodoviária a ser estudada. O usuário configura através dos filtros e ferramentas disponíveis no banco de dados.

b) Parametrização: O SGP-DERT tem por filosofia ser um sistema aberto e que permita ao planejador configurá-lo e adequá-lo às reais necessidades do órgão. As calibrações de análises anteriores servem de *input* para um novo estudo.

Dentre os parâmetros que podem ser configurados, são citados a seguir os mais importantes:

Conceito do Tráfego: O tráfego é o fator de maior relevância dentro do sistema. Todos os outros parâmetros são referenciados a ele. O conceito de tráfego busca agrupar as rodovias que possuem TMDA – tráfego médio diário anual semelhantes.

Conceito do IRI e da Deflexão : Como citado anteriormente, os demais conceitos sempre estarão ligados ao tráfego. Os dados de IRI e Deflexão são agrupados em patamares por conceito de tráfego, ou seja, um mesmo valor de IRI ou de Deflexão pode ter conceito (Bom, Regular, Ruim e Péssimo) diferente, dependendo da classe do tráfego.

Tipo de Defeito e Conceito: O SGP-DERT utiliza o levantamento visual contínuo (LVC) da superfície do pavimento como forma de agrupar as rodovias em diferentes estados de condições de superfície. O conceito Fator de Equivalência de Defeitos, utilizado pelo SGP-DERT, serve para transformar vários defeitos/severidades em defeitos equivalentes, ou seja, a extensão de cada defeito/severidade é ponderada por um fator correspondente arbitrado, chamado de Fator de Equivalência de Defeito.

Estrutura Tipo e Estrutura Padrão: O SGP-DERT permite que esta composição possa variar desde a forma mais simples a mais complexa. O Banco de dados e a confiança nas informações é que irão definir a precisão adotada.

c) Modelo Matemático: O SGP-DERT utiliza modelo matemático, totalmente configurável pelo usuário, baseado em equações de deterioração dos pavimentos, árvore de decisão de intervenções e matriz de priorização, que simulam a situação

futura da rede em estudo, tanto em relação à condição como à necessidade de intervenções/investimentos priorizados ao longo do tempo.

Dentro desta subrotina estão os seguintes itens:

Solução Tipo e Parâmetros Resultantes: As soluções são frutos de sistematização do conhecimento das características de intervenções utilizadas pelo órgão.

Equação de Evolução: Todo pavimento, ao longo dos anos, sofre deterioração provocada pelo tráfego e pelo meio ambiente. A estimativa desta deterioração é fornecida pelas equações de evolução dos defeitos padrões, apresentadas mais adiante. É através deste modelo matemático que o SGP-DERT define o comportamento da malha. As equações são calculadas levando em consideração levantamentos efetuados a cada ano.

Fluxo da Árvore de decisão: A árvore de decisão é o coração do sistema. Nela, o engenheiro tomador de decisão configura as soluções de intervenções resultantes, levando em consideração a estrutura padrão, o tráfego, a deflexão, o IRI e o defeito padrão.

Matriz de Prioridade: A matriz de priorização é utilizada para classificar os trechos homogêneos em ordem de prioridade levando em consideração a estrutura padrão, o tráfego, a deflexão, o IRI e o defeito padrão.

O Módulo SGP-P contém as seguintes subrotinas:

Trechos Homogêneos: Os segmentos homogêneos são trechos ou segmentos de trechos rodoviários, os quais, isoladamente, possuem características estruturais e comportamentais homogêneas.

Planejamento Plurianual: Definidas as bases nas análises, a parametrização do sistema e segmentos homogêneos pelas condição dos defeitos, o sistema estará pronto para elaborar o plano plurianual.

Evolução da Malha: O SGP-DERT apresenta os resultados da condição futura da malha, considerando a realização do plano plurianual através de gráficos e de tabelas.

4.3 Detalhamento das Equações de evolução

As equações são fundamentadas na assertiva de que o defeito padrão é uma ponderação da extensão dos defeitos por fatores de importância. Por exemplo, o fator da trinca de bloco severidade 2 é menor que a trinca de fadiga de severidade 2. A definição da curva leva em consideração a evolução do defeito padrão por um determinado tempo. Um grupo de rodovias com defeito padrão de fadiga igual a 6%, depois de um ano (novo levantamento) passa a ser 10%, então se adota que para rodovias com defeito padrão de 6% evolui em um ano em 4 pontos. Tendo este tipo de informação é possível gerar uma curva de tendência para qualquer defeito padrão. As quantidades de curvas são geradas pela combinação de:

Estrutura Padrão: por exemplo, 3

Patamares de tráfego: por exemplo, 2

Patamares de deflexão: por exemplo, 3

Defeitos Padrões: por exemplo, 5

Total ($3 \times 2 \times 3 \times 5$) = 90 equações

Equações adotadas pelo SGP-DERT e fluxo de decisão

Embora previsto no SIGMA, o sistema ainda não possui nenhuma modelagem apoiada na irregularidade e na deflexão. Ou seja, ainda não existem equações de modelos de desempenho para irregularidades longitudinais e deflexões, como por exemplos: $IRI = IRI_o \times 1{,}01$; $Deflexão = DEF_o \times 1{,}03$. As equações de evolução existentes atualmente no SIGMA, correlacionam os defeitos padrões avaliados nos LVCs nos 12 tipos de estrutura padrão do sistema. Os defeitos padrões considerados, são: Afundamento (AFUND); Desgaste (DES); Remendo (REM); Trinca de fadiga (TF) e Trinca de bloco (TB). A Tabela 4.1 apresenta os tipos de estrutura padrão e os tipos de misturas asfálticas correspondentes, para os casos de pavimentos construídos ou reparados, conforme solução adotada em função do fluxo de decisão. A Tabela 4.2 apresenta as equações da estrutura padrão 1, em função da evolução dos defeitos medidos nos levantamentos e dos tipos de tráfego médio ou baixo. Nas equações, DF é o próprio defeito e as mesmas não variam com o tráfego e

nem com a estrutura padrão, ou seja, a mesma equação de evolução de um determinado defeito é adotada para qualquer tipo de estrutura padrão ou de tráfego.

Tabela 4.1 Tipos de estrutura padrão e correspondentes misturas asfálticas do SGP-DERT e fluxo de decisão para a solução adotada na faixa de tráfego

Estrutura Padrão	Construído	Tráfego	Maior Defeito	Conceito Deflexão	Fluxo de decisão Solução SGP na Faixa de Tráfego
1	Mistura a Quente	Médio	REM. Péssimo	Baixo	Restauração (CBUQ/AAUQ)
2	Mistura a Quente	Baixo	DES. Péssimo	Baixo	Recapeamento (CBUQ/AAUQ)
3	Mistura a Quente	Médio	AFUND.Péssimo	Baixo	Reconstrução (CBUQ/AAUQ)
4	Mistura a Quente	Baixo	TF. Pessimo	Alto	Restauração (CBUQ/AAUQ)
5	Tratamento	Baixo	TB. Péssimo	Alto	Reconstrução (CBUQ/AAUQ)
6	Tratamento	Baixo	DES. Ruim	Baixo	Micro revestimento
7	Tratamento	Médio	DES. Péssimo	Médio	Recapeamento Delgado
8	Tratamento	Médio	REM. Péssimo	Médio	Restauração delgada (CBUQ/AAUQ)
9	Mistura a Frio	Baixo	DES. Ruim	Médio	Micro revestimento
10	Mistura a Frio	Baixo	AF. Ruim	Alto	Restauração (CBUQ/AAUQ)
11	Mistura a Frio	Médio	TF. Péssimo	Baixo	Restauração (CBUQ/AAUQ)
12	Mistura a Frio	Médio	REM. Péssimo	Baixo	Restauração (CBUQ/AAUQ)

Tabela 4.2 Equações que relacionam a estrutura padrão 1 com os respectivos defeitos e o tráfego

Estrutura Padrão	Tráfego	Defeito Padrão	Equação
1	Médio	Trinca de Fadiga	1,1537 × DF + 0.86
1	Médio	Trinca de Bloco	1,1068 × DF
1	Médio	Remendo	1,22 × DF + 0.3814
1	Médio	Afundamento	DF
1	Médio	Desgaste	DF
1	Baixo	Trinca de Fadiga	1,1537 × DF + 0.86
1	Baixo	Trinca de Bloco	1,1068 × DF
1	Baixo	Remendo	1,22 × DF + 0.3814
1	Baixo	Afundamento	DF
1	Baixo	Desgaste	DF

4.4 Levantamentos efetuados no SGP-DERT

4.4.1. Levantamento de Irregularidade Longitudinal

Para a medição das irregularidades longitudinais foi utilizado pela consultora em 2001, um sistema descrito em ENGEFOTO (2002) como sendo um medidor de irregularidade do tipo resposta, denominado ROMDAS. A título ilustrativo, a Figura 4.3 retirada do site da ROMDAS, mostra um equipamento ROMDAS *Bump Integrator* (BI), instalado em um veículo. Este equipamento foi adotado por possuir um alto rendimento de aquisição de medidas. O sistema é constituído por um instrumento medidor tipo-resposta acoplado a um veículo tipo passeio médio, obtendo como leituras, o somatório dos deslocamentos verticais retificados (isto é, em valores absolutos) do eixo traseiro do veículo em relação à carroceria do mesmo. Os valores da irregularidade longitudinal são acumulados a lances de 200m de extensão.

Figura 4.3 Equipamento ROMDAS BI instalado em um veículo (*site* da ROMDAS)

Bases de calibração foram montadas nos trechos do DERT para assegurar a confiabilidade dos dados. Inicialmente, os trechos são selecionados por tipos de superfície e de condição de conforto de pavimentos variados. Um engenheiro devidamente treinado marca com tinta uma extensão de 200m. Em seguida, a irregularidade destes trechos é aferida através da

obtenção do perfil do pavimento com o equipamento Merlin, descrito no Capítulo 2. Para gerar boas equações, que possibilitem as transformações das leituras em IRI, foi necessário construir bases com irregularidade alta, média e baixa, de forma a gerar uma nuvem de pontos em cada extremo da curva e uma central.

No levantamento de cada trecho, se fez necessária a interdição da faixa de interesse com o auxílio de policiais militares, rodoviários ou agentes de trânsito, possibilitando a marcação de cada trilha de roda, com marcas em tinta branca, distanciadas de 20 m. Na fase seguinte, o perfil de cada base de calibração é processado utilizando o método de Nível e Mira da norma DNER-ES 173/86 e transformado na escala padrão de irregularidade IRI.

Após o levantamento de campo, a calibração propriamente é realizada como descrito a seguir:

1. Verificação no local de calibração ou no local de início de cada trecho, antes de qualquer levantamento, se há quatro imãs na roda traseira direita do veículo e se estão bem posicionados;

2. Verificação da distância entre os magnetos e o sensor;

3. Antes da calibração deve ser efetuado o alinhamento e o balanceamento das quatro rodas e da roda sobressalente;

4. Calibração diária dos pneumáticos, antes de cada levantamento. Para este tipo de levantamento é adotada a pressão de 28 libras (para os quatro pneus), que é a pressão recomendada para dias quentes;

5. Controle da quilometragem do veículo;

6. Ajuste do medidor de distância.

As equações de calibração são obtidas pela aplicação do método dos mínimos quadrados a um conjunto de pares de IRI e de Li, obtidos dos diversos trechos de referência de distintas irregularidades. Para a realização do levantamento, o veículo deve se posicionar no início

do trecho, em seguida, a uma velocidade controlada de 30, 50 ou 70km/h, o carro deverá se deslocar até o final do trecho.

4.4.2. Levantamento Visual Contínuo

O Levantamento Visual Contínuo (LVC) consiste em uma avaliação da condição da superfície do pavimento, por um engenheiro treinado, a bordo de um veículo equipado com instrumentos adequados, conforme ilustrado na Figura 4.4. É realizado sistematicamente pelo DERT, praticamente a cada ano em toda a malha pavimentada.

O objetivo deste levantamento é a coleta de informações para:

- Verificar o grau de deterioração do pavimento;
- Servir de base para indicar a intervenção apropriada;
- Ser um dos fatores para análise da priorização para investimentos;
- Fornecer subsídio para elaboração de equações de comportamento dos defeitos.

Figura 4.4 Interior de um veículo equipado com instrumentos adequados para o LVC (ENGEFOTO, 2002)

Metodologia

A metodologia desenvolvida para o SIGMA pela ENGEFOTO (2002) para a realização deste levantamento é necessário, por equipe de inventário, um engenheiro treinado, um motorista, um carro equipado com dispositivos de segurança, *hardware* e *software* compatíveis com a metodologia. Esta, por sua vez, consiste em um levantamento visual da superfície do pavimento (pista e acostamento), onde o engenheiro irá registrar o quilômetro de início e de final de cada defeito (ou marco de início mais distância, marco final mais distância) e a severidade observada. O levantamento é efetuado em apenas uma das faixas de tráfego, sendo escolhida para ser inventariada a de pior condição. A Tabela 4.3, a título de exemplo, descreve um desses defeitos. No Capítulo 5 será mostrados a forma de obtenção da nota final e o respectivo conceito, transformando os defeitos/severidades em defeitos equivalentes.

Tabela 4.3 Defeito, severidade e recomendações no LVC

Nº	Designação	Unidade de medida	Severidade	Recomendações
1	Trincas não associadas à carga ou trincas de bloco	Extensão	1. Blocos > 1m. 2. Blocos entre 40 cm e 1 m. 3. Blocos < 40 cm.	1. Quando ocorrerem trincas transversais com espaçamento maior que 10m entre elas, apenas deve ser registrada uma ocorrência pontual e não o início e final desse defeito. 2. Ocorrendo blocos entre 40cm e 1m, com forte erosão na borda, onde haja muito comprometimento de capa, deve-se cadastrar como severidade 3. 3. Quando os blocos estiverem totalmente descaracterizados pelo efeito do tráfego, deve-se cadastrá-lo como trinca de fadiga. 4 Quando ocorrerem falhas de emenda entre as faixas de aplicação do material betuminoso, não se deve cadastrar dados.

Quando, na mesma posição transversal, ocorrer o mesmo defeito, com severidades diferentes, o engenheiro avaliador deverá registrar apenas a maior delas, conforme é mostrado na Figura 4.5.

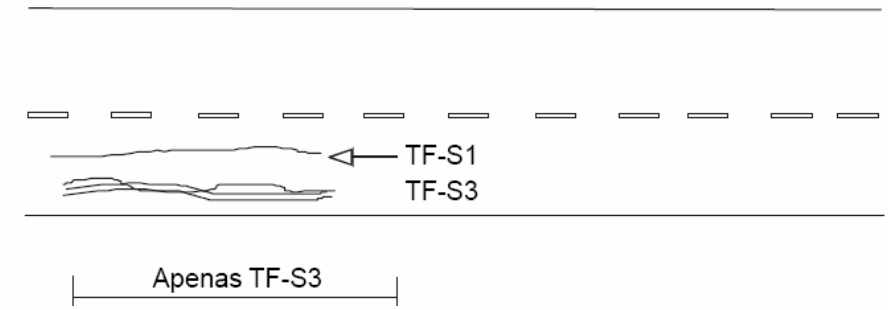


Figura 4.5 Escolha e registro da maior severidade

Na ocorrência de dois defeitos diferentes, na mesma posição, deverá ser realizado o levantamento e o cadastramento de ambos os defeitos, conforme Figura 4.6.

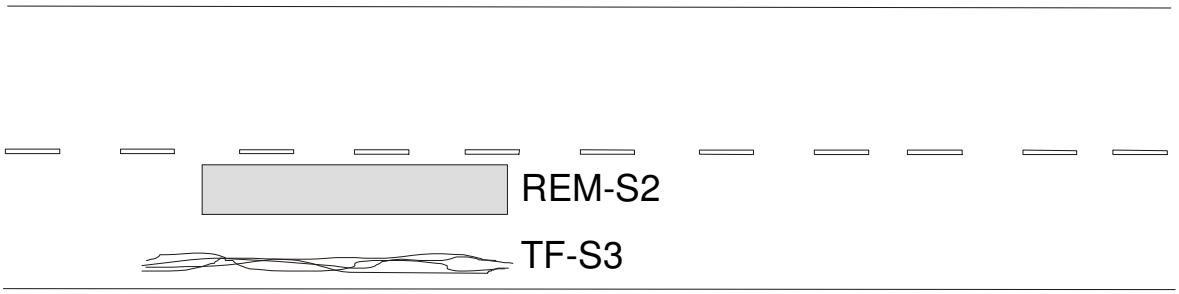


Figura 4.6 Levantamento e cadastramento de dois defeitos diferentes

4.4.3 Levantamento Deflectométrico

A consultora ENGEFOTO (2002) utilizou para o levantamento deflectométrico um equipamento KUAB 2m 50 FWD, próprio, de fabricação Sueca, que já havia sido usado em trabalhos desenvolvidos em outros estados brasileiros que atestaram a sua adequação aos fins pretendidos, ou seja: adquirir dados deflectométricos corretos e confiáveis. Este equipamento, segundo a consultora, permite simular com boa aproximação a ação de uma carga dinâmica rodoviária, inclusive no que diz respeito à sua magnitude.

O equipamento FWD é montado em um trailer e protegido por uma carenagem metálica, conforme mostrado na Figura 4.7. Um pequeno caminhão é utilizado para rebocar o FWD durante o processo de levantamento de campo. Por questões de segurança, a consultora utilizou sempre um veículo como "batedor", posicionando-o algumas dezenas de metros atrás do FWD. Este veículo de apoio foi concebido e preparado para impactar visualmente os motoristas que se aproximam do local onde se está determinando a deformada, através do uso de sinalização luminosa ("*giroflex*" duplo) de alta eficiência e de pinturas de faixas reflexivas.

Figura 4.7 Vista externa do FWD usado nos levantamentos do DERT-CE (ENGEFOTO, 2002)

A operação do FWD é totalmente automatizada, sendo comandada a partir de um microcomputador instalado na cabine do veículo trator, mostrada na Figura 4.8, por um único operador especificamente treinado para esta função.

Figura 4.8 Detalhe da cabine do veículo para a operação do FWD (ENGEFOTO, 2002)

A medição de distâncias tem sua qualidade assegurada pelo uso de um sistema digital controlado por *software* (DMI), periodicamente aferido em trechos de calibração de extensões conhecidas. No instante da medição de uma deformada, o equipamento é estacionado e um comando do operador faz com que um par de pernas metálicas rígidas seja abaixado, aliviando o peso sobre as rodas pneumáticas do equipamento e assegurando firmeza na sua posição durante o ensaio. A carenagem inferior é aberta e o sistema composto pela placa circular e pela barra que sustenta os sensores é apoiado sobre o pavimento.

A carga de impulso é gerada por um sistema de "peso batente" composto por duas massas, conforme indicado no esquema apresentado na Figura 4.9.

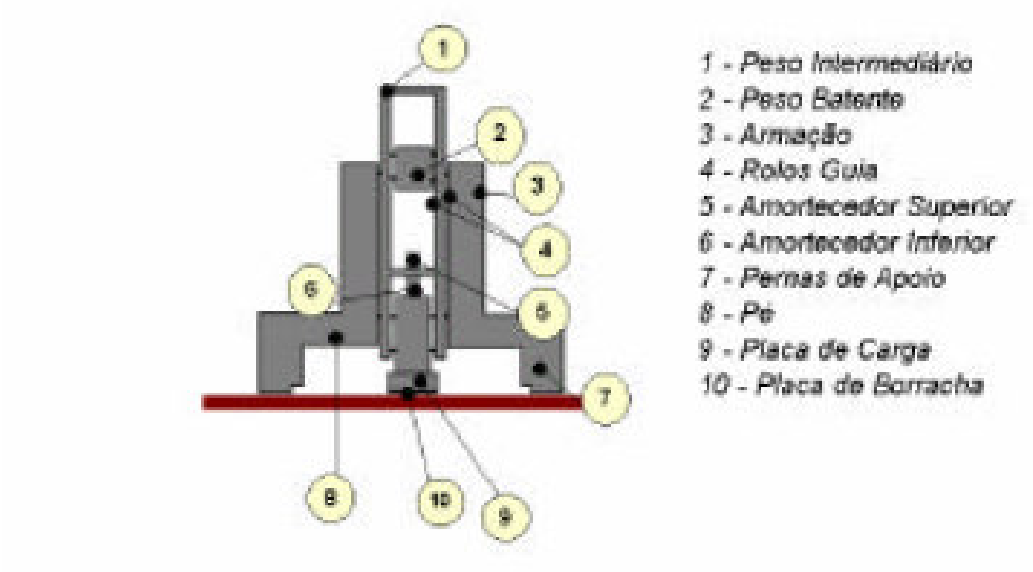

1 - Peso Intermediário
2 - Peso Batente
3 - Armação
4 - Rolos Guia
5 - Amortecedor Superior
6 - Amortecedor Inferior
7 - Pernas de Apoio
8 - Pé
9 - Placa de Carga
10 - Placa de Borracha

Figura 4.9 Esquema de cargas do FWD (ENGEFOTO, 2002)

A armação ou estrutura principal direciona a unidade de impacto de forma perpendicular à superfície do pavimento. O sistema de peso batente é programado para cair a partir de uma altura compatível com a carga desejada, controlado pelo operador a partir do microcomputador de bordo.

O KUAB 2m 50 FWD trabalha com um tempo total de pulso de 0,060 s e com tempo de ascensão da carga de 0,024 s. A carga de pico pode ser obtida, para este tempo de ascensão, no intervalo de 12 a 50 KN. O equipamento é equipado com uma célula de carga, que

permite registrar a carga de pico efetivamente aplicada em cada ensaio e é equipado com 7 (sete) transdutores de deflexão (sismômetros), que utilizam um sistema de massa inercial como referência e LVDT's como elementos de medição. É possível alterar a disposição dos sensores ao longo da barra de suporte, dentro de certos limites, para ajuste a estudos específicos. Os sismômetros são equipados com parafusos micrométricos, que permitem a sua adequada calibração estática, o que pode ser feito no próprio campo.

"*A priori*" do levantamento de cada trecho, o operador registra as informações correspondentes (SRE, limites, etc.), assim como define os padrões a serem adotados nos ensaios. Um termômetro, com princípio em raios infravermelhos, registra, a cada determinação, a temperatura da superfície do pavimento. Simultaneamente, é também registrada a temperatura do ar. Todos os dados do ensaio (carga de pico, deflexões, temperaturas, leituras do DMI) são automaticamente transferidos para o microcomputador.

Considerando-se o FWD posicionado na estação de ensaio, a seqüência completa de operações para uma medição envolve, portanto, as seguintes atividades:

- Abaixamento das pernas rígidas de suporte;
- Posicionamento da placa e sensores sobre o pavimento;
- Aplicação das duas cargas de impacto e registro da carga de pico e deflexões;
- Levantamento da placa e sensores;
- Levantamento das pernas rígidas.

Todo o processo descrito decorre em um tempo total da ordem de 35 s.

A referência adotada foi o procedimento normatizado pelo DNER: PRO-273/96 – Determinação de deflexões utilizando o deflectômetro de impacto.

Os registros de distâncias, que permitiram localizar o equipamento na posição de ensaio desejada, foram definidos pelo DMI do equipamento e referenciados também às marcações de pista efetuadas a cada km. As determinações foram feitas na trilha de roda externa, a aproximadamente a 90 cm da borda do pavimento. A carga aplicada foi de 40 kN, sendo sua magnitude controlada efetivamente pela célula de carga do equipamento.

4.5 Dados gerais sobre a malha viária estadual do Ceará

A extensão da malha rodoviária do Estado do Ceará é de 52.159,3 km, sendo 8.308,2 km de rodovias pavimentadas e 43.851,1 km de rodovias não pavimentadas. Considerando-se apenas a malha sob a jurisdição estadual, de um total de 10.715,6 km, as rodovias com revestimento asfáltico atingem pouco mais de 53% (5.755,1 km) e as não pavimentadas implantadas em revestimento primário em torno de 30% (3.119,5 km) enquanto as rodovias em leito natural uma extensão de 1.841,0 km, cerca de 17% (DERT, 2003). Na figura 4.10 é apresentado o estado de conservação da malha pavimentada em 2002/2003, enquanto que na Figura 4.11, para efeitos de comparação, é mostrado o estado de conservação da mesma malha pavimentada em 2005. Verifica-se, na análise das condições da malha que as ações de M&R procedidas pelo DERT-CE no período aludido, ocasionaram uma melhora substancial no estado de conservação da malha.

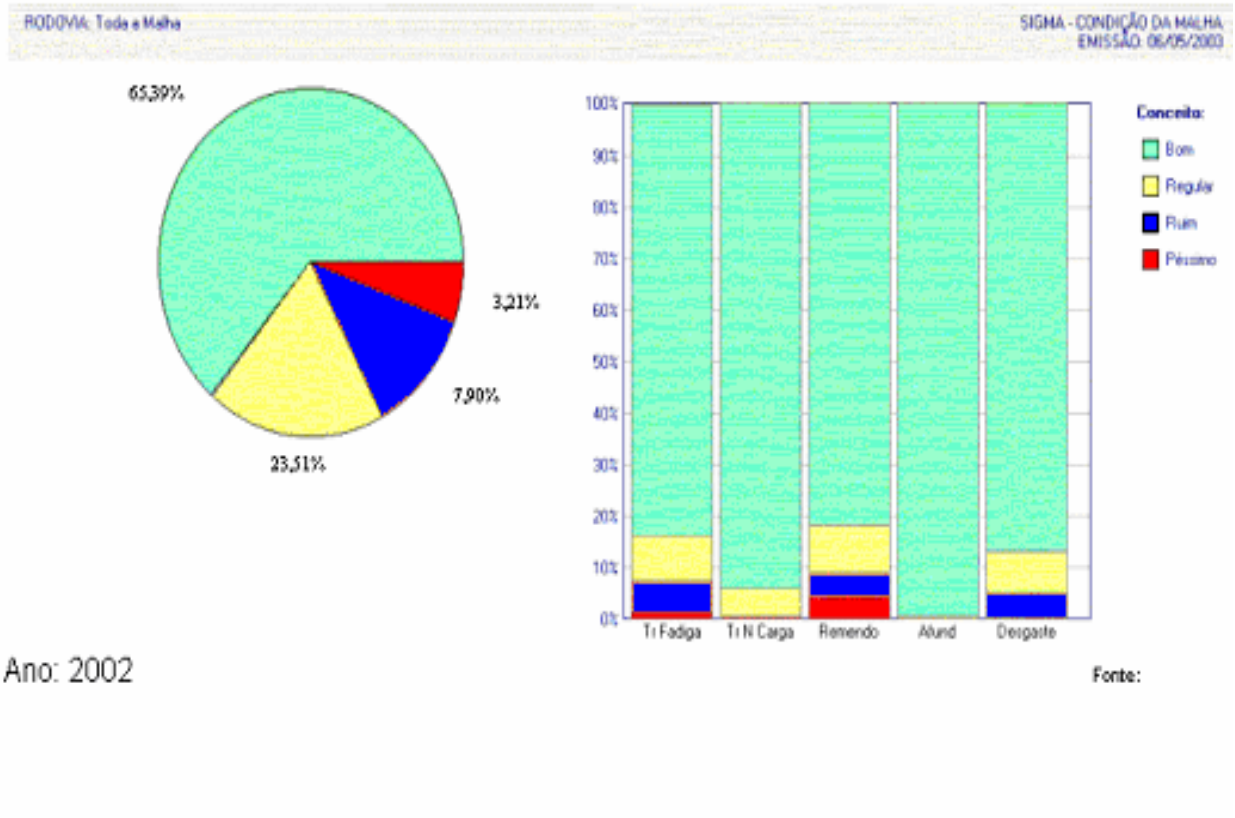


Figura 4.10 Condição da malha viária estadual do Ceará em 2002/2003 (DERT, 2003)

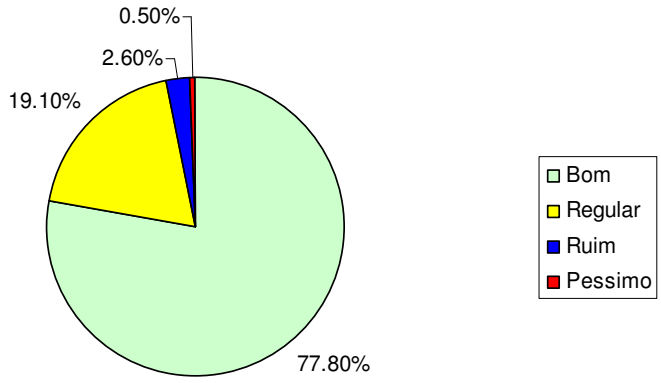


Figura 4.11 Condição da malha viária estadual do Ceará em 2005 (ENGEVIAS, 2006)

4.6 Banco de dados do SIGMA do DERT-CE

O banco de dados do SIGMA do DERT é composto de 938 trechos assim distribuídos: 565 pavimentados, dos quais 517 em pista simples e 48 em pista dupla; 133 implantados em revestimento primário; 12 com revestimento em pedra poliédrica; 167 em leito natural e 61 em planejamento. Os 142 trechos da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), de onde foram escolhidos os trechos desta pesquisa, são assim distribuídos: 116 pavimentados, dos quais 76 em pista simples e 40 em pista dupla; 6 implantados em revestimento primário; Um (1) com revestimento em pedra poliédrica; 6 em leito natural e 13 em planejamento (ENGEVIAS, 2006).

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISE DOS LEVANTAMENTOS DOS TRECHOS ESCOLHIDOS NESTA PESQUISA

5.1 Geomorfologia da Região Metropolitana de Fortaleza

Os trechos escolhidos para esta pesquisa estão situados na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Geograficamente a RMF está localizada a nordeste do estado do Ceará. Limita-se ao norte com o Oceano Atlântico, ao sul com os municípios de Caridade, Palmácia, Redenção, Pacajús e Horizonte, ao leste com o município de Pindoretama e com o Oceano Atlântico e oeste com os municípios de São Gonçalo do Amarante e Pentecoste. A região abrange uma área de 3.483 km^2 estando posicionada no polígono formado pelas longitudes a leste (38°13'18,3") e ao oeste (39°00'00") e entre as latitudes norte (3°33'63") e sul (4°10'44,5").

A região é servida por um sistema viário com rodovias federais, estaduais e em menor escala, municipais. Estas rodovias, em sua maioria, se originam em Fortaleza irradiando-se para outros estados e para as sedes dos demais municípios que compõem a região.

Os 72 trechos escolhidos, sob a jurisdição do DERT (Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes), perfazem um total de 493,946 km de rodovias, sendo 235,466 km (47,67%) com revestimento em concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ, 81,240 km (16,45 %) em areia asfalto usinado a quente - AAUQ e 177,240 km (35,88%) em tratamento superficial duplo - TSD. Constituem assim uma amostra bastante representativa da malha rodoviária estadual por apresentarem uma forte caracterização dos tipos de revestimento mais utilizados, assim como dos tipos de tráfego e das condições climáticas. A Figura 5.1 mostra os trechos escolhidos e as respectivas numerações para esta pesquisa.

Os trechos foram escolhidos por cumprirem importantes funções no sistema viário urbano da RMF e na malha rodoviária do estado do Ceará. Atravessam em grande parte áreas de ocupação medianamente adensadas e com baixa utilização do solo lindeiro. Cortam áreas urbanas, com características residenciais e comerciais, além de forte potencial industrial. Os seus traçados são predominantemente em relevos planos, passando a ondulado em algumas localidades.

Na Tabela 5.1 são apresentados os dados e alguns resultados de levantamentos anteriores a esta pesquisa dos trechos escolhidos, tais como: extensão; tipo de revestimento; dados de tráfego com VDM do ano de 2004, considerando todo o volume de tráfego, os valores da Deflexão e do IRI do ano de 2001 e ainda os levantamentos de defeitos efetuados pelo LVC em 2004, tais como Trinca de Fadiga (TF), Trinca de bloco (TB), Remendo (REM), Afundamento (AFUND) e Desgaste (DES). Os resultados do IRI no ano de 2001 foram obtidos utilizando-se um sistema medidor de irregularidade do tipo resposta, denominado "ROMDAS", conforme citado e descrito no Capítulo 4.

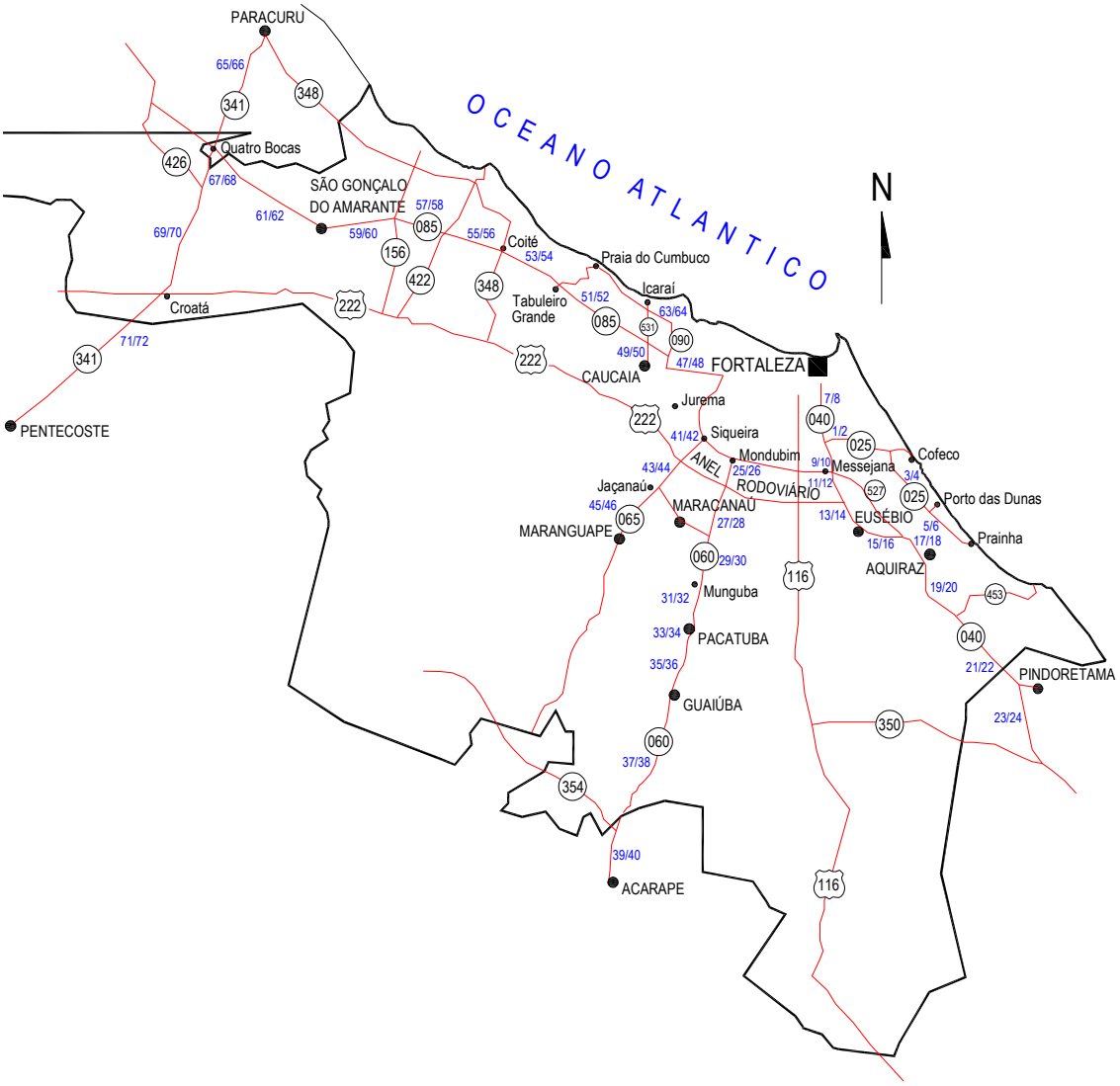


Figura 5.1 Localização dos trechos desta pesquisa na RMF

Tabela 5.1 Trechos escolhidos para a pesquisa desta tese e dados de levantamentos anteriores

Nº Trecho	Código do Trecho	Origem-Destino	Ext. (m)	Revestimento		VDM		Deflexão (1/100 mm)		IRI		Defeitos					
				Tipo	Ano	Veículo / dia	Ano da Contagem	Deflexão (1/100 mm)	Ano	Valor do IRI	Ano	TF	TB	RM	AF	DES	Ano
1	025ECE0010D	ENTR CE-040(FORTALEZA) - ENTR CE-506 p/ COFECO	6335	CBUQ	1995	8237	2004	41	2001	3,9	2001	1	1	1	0	0	2004
2	025ECE0010E	ENTR CE-040(FORTALEZA) - ENTR CE-506 p/ COFECO	6335	CBUQ	1995	8237	2004	39	2001	3,9	2001	1	1	1	0	0	2004
3	025ECE0030D	ENTR CE-506 p/ COFECO - PORTO DAS DUNAS	6988	AAUQ	1995	6430	2004	45	2001	4,3	2001	1	1	1	0	0	2004
4	025ECE0030E	ENTR CE-506 p/ COFECO - PORTO DAS DUNAS	6988	AAUQ	1995	6430	2004	45	2001	4,3	2001	1	1	1	0	0	2004
5	025ECE0050D	PORTO DAS DUNAS - ENTR CE-452 p/ PRAINHA	5072	AAUQ	1995	6290	2004	30	2001	3,6	2001	1	1	1	0	0	2004
6	025ECE0050E	PORTO DAS DUNAS - ENTR CE-452 p/ PRAINHA	5072	AAUQ	1995	6290	2004	32	2001	3,6	2001	1	1	1	0	0	2004
7	040ECE0010D	FORTALEZA(AV. PADRE ANTÔNIO THOMAZ)-ENTR.CE-025	6940	CBUQ	1995	50062	2004	32	2001	4,1	2001	2	1	1	0	0	2004
8	040ECE0010E	FORTALEZA(AV. PADRE ANTÔNIO THOMAZ)-ENTR.CE-025	6907	CBUQ	1998	46122	2004	36	2001	3,8	2001	1	0	0	0	0	2004
9	040ECE0030D	ENTR.CE-025-MESSEJANA	2460	CBUQ	1998	15330	2004	26	2001	2,9	2001	0	0	0	0	0	2004
10	040ECE0030E	ENTR.CE-025-MESSEJANA	2451	CBUQ	1998	14230	2004	29	2001	2,7	2001	1	0	0	0	0	2004
11	040ECE0050D	MESSEJANA-ANEL RODOVIÁRIO	4294	CBUQ	1998	9360	2004	23	2001	2,1	2001	0	0	0	0	0	2004
12	040ECE0050E	MESSEJANA-ANEL RODOVIÁRIO	4335	CBUQ	1998	8214	2004	25	2001	2,6	2001	0	0	0	0	0	2004
13	040ECE0070D	ANEL RODOVIÁRIO-ENTR.CE-251(EUSÉBIO)	5310	CBUQ	2003	10364	2004	30	2001	2,1	2001	1	0	0	0	0	2004
14	040ECE0070E	ANEL RODOVIÁRIO-ENTR.CE-251(EUSÉBIO)	5302	CBUQ	2003	9772	2004	30	2001	2,3	2001	0	0	0	0	0	2004
15	040ECE0090D	ENTR.CE-251(EUSÉBIO)-ENTR.CE-527 p/ AQUIRAZ(NORTE)	3869	CBUQ	2003	5768	2004	29	2001	2,9	2001	1	1	0	0	0	2004
16	040ECE0090E	ENTR.CE-251(EUSÉBIO)-ENTR.CE-527 p/ AQUIRAZ(NORTE)	3907	CBUQ	2003	5662	2004	25	2001	2,9	2001	0	0	0	0	0	2004

Tabela 5.1 Trechos escolhidos para a pesquisa desta tese e dados de levantamentos anteriores

Nº Trecho	Código do Trecho	Origem-Destino	Ext. (m)	Revestimento		VDM		Deflexão (1/100 mm)		IRI		Defeitos					
				Tipo	Ano	Veículo / dia	Ano da Contagem	Deflexão (1/100 mm)	Ano	Valor do IRI	Ano	TF	TB	RM	AF	DES	Ano
17	040ECE0110D	ENTR.CE-527 p/ AQUIRAZ(N)-ENTR.CE-452(AQUIRAZ)(SUL	2533	CBUQ	2003	6320	2000	34	2001	3,1	2001	1	0	0	0	0	2004
18	040ECE0110E	ACS. NORTE p/ AQUIRAZ-ENTR.CE-452(AQUIRAZ)(SUL)	2511	CBUQ	2003	6320	2000	40	2001	3,4	2001	1	0	0	0	0	2004
19	040ECE0130D	ENTR.CE-452(AQUIRAZ)(SUL)-ENTR.CE-453(FACUNDES)	6488	CBUQ	2004	8672	2004	29	2001	3,0	2001	0	0	0	0	0	2004
20	040ECE0130E	ENTR.CE-452(AQUIRAZ)(SUL)-ENTR.CE-453(FACUNDES)	6488	CBUQ	2004	8672	2004	29	2001	3,0	2001	0	0	0	0	0	2004
21	040ECE0150D	ENTR.CE-453(FACUNDES)-ENTR.CE-454 p/ PINDORETAMA	9131	CBUQ	2004	6667	2004	26	2001	3,0	2001	1	0	0	0	0	2004
22	040ECE0150E	ENTR.CE-453(FACUNDES)-ENTR.CE-454 p/ PINDORETAMA	9131	CBUQ	2004	6667	2004	26	2001	3,0	2001	1	0	0	0	0	2004
23	040ECE0170D	ENTR.CE-454 p/ PINDORETAMA-ENTR.CE-350 p/ COLUNA	9940	CBUQ	2004	6667	2004	29	2001	3,0	2001	0	0	0	0	0	2004
24	040ECE0170E	ENTR.CE-454 p/ PINDORETAMA-ENTR.CE-350 p/ COLUNA	9940	CBUQ	2004	6667	2004	29	2001	3,0	2001	0	0	0	0	0	2004
25	060ECE0010D	MONDUBIM(AV. PERIMETRAL)-ANEL RODOVIÁRIO	3838	CBUQ	1998	11618	2004	44	2001	3,6	2001	5	0	0	0	0	2004
26	060ECE0010E	MONDUBIM(AV. PERIMETRAL)-ANEL RODOVIÁRIO	3829	CBUQ	1998	10646	2004	42	2001	3,3	2001	8	0	0	0	0	2004
27	060ECE0030D	ANEL RODOVIÁRIO-ENTR.CE-251 p/ MARACANAÚ	3806	CBUQ	1995	3938	2004	36	2001	3,5	2001	7	3	2	0	0	2004
28	060ECE0030E	ANEL RODOVIÁRIO-ENTR.CE-251 p/ MARACANAÚ	3778	CBUQ	1995	4472	2004	33	2001	3,3	2001	9	0	1	0	0	2004
29	060ECE0050D	ENTR.CE-251 p/ MARACANAÚ-ENTR.CE-50(A)(MUNGUBA)	5809	CBUQ	1998	2492	2004	42	2001	3,1	2001	8	2	0	1	0	2004
30	060ECE0050E	ENTR.CE-251 p/ MARACANAÚ-ENTR.CE-50(A)(MUNGUBA)	5819	CBUQ	1998	2254	2004	44	2001	3,6	2001	10	0	0	1	0	2004

Tabela 5.1 Trechos escolhidos para a pesquisa desta tese e dados de levantamentos anteriores

Nº Trecho	Código do Trecho	Origem-Destino	Ext. (m)	Revestimento		VDM		Deflexão (1/100 mm)		IRI		Defeitos					
				Tipo	Ano	Veículo / dia	Ano da Contagem	Deflexão (1/100 mm)	Ano	Valor do IRI	Ano	TF	TB	RM	AF	DES	Ano
31	060ECE0070D	ENTR.CE-350(A)(MUNGUBA)-ENTR.CE-350(B)(PACATUBA)	6257	CBUQ	1998	2492	2004	39	2001	3,1	2001	6	0	0	0	0	2004
32	060ECE0070E	ENTR.CE-350(A)(MUNGUBA)-ENTR.CE-350(B)(PACATUBA)	6204	CBUQ	1998	2254	2004	42	2001	3,2	2001	6	0	0	0	0	2004
33	060ECE0090D	ENTR.CE-350(B)(PACATUBA)-ACS. SUL p/ PACATUBA	1950	CBUQ	1998	2492	2004	36	2001	3,3	2001	7	0	0	0	0	2004
34	060ECE0090E	ENTR.CE-350(B)(PACATUBA)-ENTR. SUL p/ PACATUBA	1974	CBUQ	1998	2254	2004	36	2001	3,4	2001	5	0	0	1	0	2004
35	060ECE0110D	ENTR. SUL p/ PACATUBA-GUAIÚBA	5267	CBUQ	1998	3832	2004	45	2001	3	2001	13	0	9	0	1	2004
36	060ECE0110E	ENTR. SUL p/ PACATUBA-GUAIÚBA	5267	CBUQ	1998	3832	2004	45	2001	3	2001	13	0	9	0	1	2004
37	060ECE0130D	GUAIÚBA-ENTR.CE-354(A)	15865	CBUQ	1998	3832	2004	33	2001	2,9	2001	10	0	2	0	0	2004
38	060ECE0130E	GUAIÚBA-ENTR.CE-354(A)	15865	CBUQ	1998	3832	2004	33	2001	2,9	2001	10	0	2	0	0	2004
39	060ECE0150D	ENTR.CE-354(A)-ENTR.CE-253(A)/354(B)(ACARAPE)	6921	CBUQ	1998	3832	2004	35	2001	2,9	2001	4	0	2	0	0	2004
40	060ECE0150E	ENTR.CE-354(A)-ENTR.CE253 (ACARAPE)	6921	CBUQ	1998	3832	2004	35	2001	2,9	2001	4	0	2	0	0	2004
41	065ECE0010D	SIQUEIRA(AV. PERIMETRAL)-ANEL RODOVIÁRIO	316	CBUQ	1998	5076	2004	55	2001	3,4	2001	12	4	3	0	0	2004
42	065ECE0010E	SIQUEIRA(AV. PERIMETRAL)-ANEL RODOVIÁRIO	316	CBUQ	1998	5076	2004	55	2001	4,4	2001	12	4	3	0	0	2004
43	065ECE0030D	ANEL RODOVIÁRIO-ENTR.CE-251(JAÇANAÚ)	3564	CBUQ	1998	5136	2004	30	2001	2,6	2001	21	0	0	0	0	2004
44	065ECE0030E	ANEL RODOVIÁRIO-ENTR.CE-251(JAÇANAÚ)	3597	CBUQ	1998	5078	2004	34	2001	2,6	2001	9	0	0	0	0	2004
45	065ECE0050D	ENTR.CE-251(JAÇANAÚ)-ENTR.CE-350(MARANGUAPE)	6835	CBUQ	1998	3818	2004	34	2001	2,6	2001	8	1	0	0	0	2004
46	065ECE0050E	ENTR.CE-251(JAÇANAÚ)-ENTR.CE-350(MARANGUAPE)	6861	CBUQ	1998	3794	2004	34	2001	2,5	2001	9	0	0	0	0	2004
47	085ECE0030D	ENTR LESTE p/ CAUCAIA - ENTR CE-090	1483	TSD	1995	4686	2004	56	2001	4,5	2001	24	0	16	2	5	2004

Tabela 5.1 Trechos escolhidos para a pesquisa desta tese e dados de levantamentos anteriores

Nº Trecho	Código do Trecho	Origem-Destino	Ext. (m)	Revestimento		VDM		Deflexão (1/100 mm)		IRI		Defeitos					
				Tipo	Ano	Veículo / dia	Ano da Contagem	Deflexão (1/100 mm)	Ano	Valor do IRI	Ano	TF	TB	RM	AF	DES	Ano
48	085ECE0030E	ENTR LESTE p/ CAUCAIA - ENTR CE-090	1483	TSD	1995	4686	2004	56	2001	4,5	2001	24	0	16	2	5	2004
49	085ECE0050D	ENTR CE-090 - ENTR CE-531 p/ ICARAÍ	1956	TSD	1995	1956	2004	49	2001	3,8	2001	4	0	0	0	0	2004
50	085ECE0050E	ENTR CE-090 - ENTR CE-531 p/ ICARAÍ	1956	TSD	1995	1956	2004	49	2001	3,8	2001	4	0	0	0	0	2004
51	085ECE0070D	ENTR CE-531 p/ ICARAÍ - ENTR CE-544(TABULEIRO GRANDE)	14728	TSD	1995	3156	2004	50	2001	3,8	2001	2	0	0	0	0	2004
52	085ECE0070E	ENTR CE-531 p/ ICARAÍ - ENTR CE-544(TABULEIRO GRANDE)	14728	TSD	1995	3156	2004	50	2001	3,8	2001	2	0	0	0	0	2004
53	085ECE0090D	ENTR CE-544(TABULEIRO GRANDE) - ENTR CE-348 (COITÉ)	8337	TSD	1995	2612	2004	43	2001	4,0	2001	1	0	0	0	0	2004
54	085ECE0090E	ENTR CE-544(TABULEIRO GRANDE) - ENTR CE-348 (COITÉ)	8337	TSD	1995	2612	2004	43	2001	4,0	2001	1	0	0	0	0	2004
55	085ECE0110D	ENTR CE-348(COITÉ) - ENTR CE-422	4392	TSD	1995	1907	2004	55	2001	4,1	2001	2	0	0	0	0	2004
56	085ECE0110E	ENTR CE-348(COITÉ) - ENTR CE-422	4392	TSD	1995	1907	2004	55	2001	4,1	2001	2	0	0	0	0	2004
57	085ECE0130D	ENTR CE-422 - ENTR CE-156 (ACENDE CANDEIA)	6628	TSD	1995	1907	2004	54	2001	3,8	2001	2	0	1	0	0	2004
58	085ECE0130E	ENTR CE-422 - ENTR CE-156 (ACENDE CANDEIA)	6628	TSD	1995	1907	2004	54	2001	3,8	2001	2	0	1	0	0	2004
59	085ECE0150D	ENTR CE-156 (ACENDE CANDEIA) - ENTR CE-423 (SÃO GONÇALO DO AMARANTE)	8658	TSD	1995	1907	2004	66	2001	3,6	2001	14	0	3	0	0	2004
60	085ECE0150E	ENTR CE-156 (ACENDE CANDEIA) - ENTR CE-423 (SÃO GONÇALO DO AMARANTE)	8658	TSD	1995	1907	2004	66	2001	3,6	2001	14	0	3	0	0	2004
61	085ECE0170	ENTR CE-423 (SÃO G. DO AMAR.) - ENTR CE-341(QUATRO BOCAS)	14291	TSD	1995	1634	2004	58	2001	3,8	2001	1	0	0	0	0	2004

Tabela 5.1 Trechos escolhidos para a pesquisa desta tese e dados de levantamentos anteriores

Nº Trecho	Código do Trecho	Origem-Destino	Ext. (m)	Revestimento		VDM		Deflexão (1/100 mm)		IRI		Defeitos					
				Tipo	Ano	Veículo / dia	Ano da Contagem	Deflexão (1/100 mm)	Ano	Valor do IRI	Ano	TF	TB	RM	AF	DES	Ano
62	085ECE0170	ENTR CE-423 (SÃO G. DO AMAR.) - ENTR CE-341(QUATRO BOCAS)	14291	TSD	1995	1634	2004	58	2001	3,8	2001	1	0	0	0	0	2004
63	090ECE0010D	ENTR CE-085 - ENTR CE-531(ICARAÍ)	7244	TSD	1994	3334	2004	42	2001	4,5	2001	18	1	6	0	0	2004
64	090ECE0010E	ENTR CE-085 - ENTR CE-531(ICARAÍ)	7244	TSD	1994	3334	2004	42	2001	4,2	2001	18	1	6	0	0	2004
65	341ECE0010D	ENTR CE-348(PARACURU) - ENTR CE-085(QUATRO BOCAS)	11561	AAUQ	1995	251	2004	39	2001	4,0	2001	3	0	0	0	0	2004
66	341ECE0010E	ENTR CE-348(PARACURU) - ENTR CE-085(QUATRO BOCAS)	11561	AAUQ	1995	251	2004	41	2001	4,0	2001	3	0	0	0	0	2004
67	341ECE0030D	ENTR CE-085(QUATRO BOCAS) - ENTR CE-426	4434	AAUQ	1995	251	2004	41	2001	2,8	2001	7	0	1	1	0	2004
68	341ECE0030E	ENTR CE-085(QUATRO BOCAS) - ENTR CE-426	4434	AAUQ	1995	251	2004	41	2001	2,8	2001	7	0	1	1	0	2004
69	341ECE0050D	ENTR CE-426 - ENTR BR-222(CROATÁ)	12565	AAUQ	1995	251	2004	38	2001	2,7	2001	3	0	0	0	0	2004
70	341ECE0050E	ENTR CE-426 - ENTR BR-222(CROATÁ)	12565	AAUQ	1995	251	2004	38	2001	2,7	2001	3	0	0	0	0	2004
71	341ECE0070D	ENTR.BR-222(CROATÁ)-ENTR.CE-162/354 (PENTECOSTE)	20903	TSD	2004	645	2004	38	2001	3,0	2001	0	0	6	0	0	2004
72	341ECE0070E	ENTR.BR-222(CROATÁ)-ENTR.CE-162/354 (PENTECOSTE)	20903	TSD	2004	645	2004	38	2001	3,0	2001	0	0	6	0	0	2004
		T O T A L	**493.946**														

Fonte DERT

5.2 Condições Climáticas, Pluviométricas e Térmicas da RMF

As considerações das condições climáticas e hidrológicas, aliadas às solicitações do tráfego e ao processo construtivo, são necessárias no estudo do comportamento de uma estrutura de pavimento e previsão de desempenho, em função da mudança de estado que os materiais podem apresentar.

As condições ambientais da RMF apresentam um clima dominante quente e semi-úmido, semi-árida, classificado como Aw e Bsh por Koppen (DNER, 1976). As variações de temperatura são pequenas, entre 26 e 30°C (região tropical), estando diretamente ligadas ao regime pluviométrico. Os baixos índices de nebulosidade, ventos alísios vindos do leste, forte insolação e altas taxas de evaporação, são fatores de influência nas condições climáticas.

O regime pluviométrico apresenta dois períodos, um com precipitações (inverno, como é chamado na RMF) e outro sem chuvas (verão). O período invernoso tem início normalmente em janeiro, estendendo-se até maio, declinando em junho, quando começa o verão ou tempo seco. As maiores precipitações ocorrem no litoral e nas zonas serranas, representadas pelas serras de Maranguape e Aratanha/Pacatuba, por influência dos ventos alísios e do relevo. Os índices pluviométricos variam entre 1200 e 1600 mm/ano.

Amplitudes térmicas anuais baixas, em torno de 5°C, e temperaturas elevadas, caracterizam o regime térmico da região, em virtude dos fatores geográficos, altitude, topografia e proximidade do mar. A umidade relativa do ar é em média de 73%. As Figuras. 5.2 a 5.8 apresentam os gráficos dos principais parâmetros climáticos, com os valores médios mensais segundo dados da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME), durante o período de 1974 a 1993.

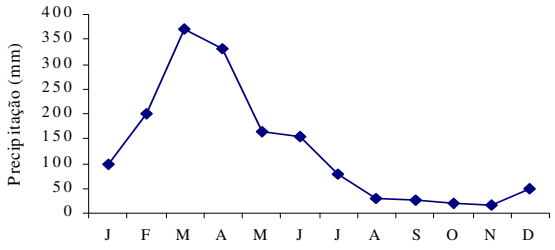


Figura 5.2 Distribuição da Precipitação na RMF (FUNCEME, 1974-1993)

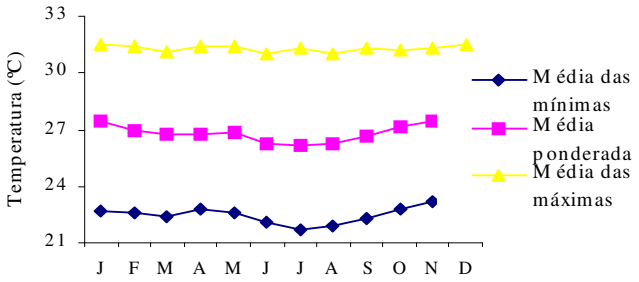


Figura 5.3 Distribuição de temperaturas na RMF (FUNCEME, 1974-1993)

A RMF, segundo o critério de Thornthwaite, apresenta a relação P – EP < 0, ou seja, a precipitação (P) menos a evapotranspiração potencial anual (EP), negativa. Na parte situada no sertão, principalmente a sotavento dos maciços orográficos, esta relação tende a ser ainda mais negativa.

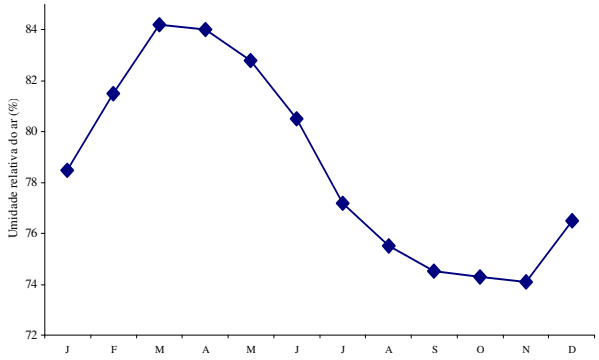


Figura 5.4 Distribuição da Umidade relativa do ar na RMF (FUNCEME, 1974-1993)

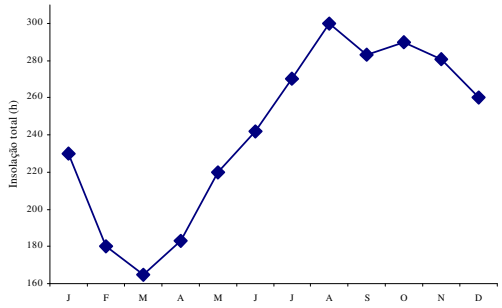


Figura 5.5 Distribuição da insolação total na RMF (FUNCEME, 1974-1993)

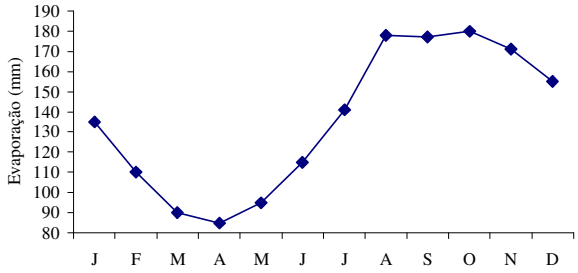


Figura 5.6 Distribuição da evaporação na RMF (FUNCEME, 1974-1993)

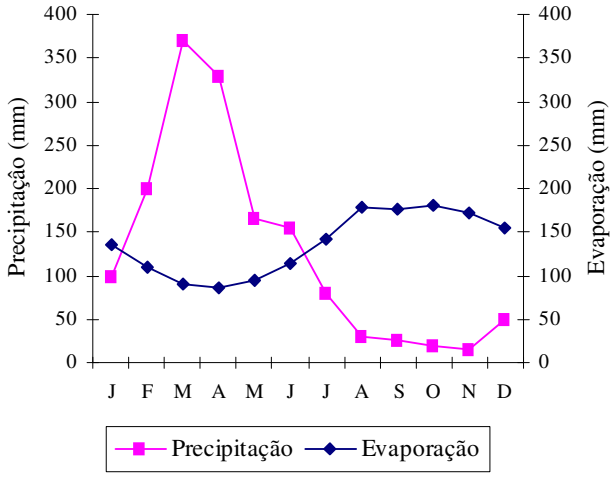


Figura 5.7 Distribuição de precipitação versus evaporação na RMF (FUNCEME, 1974-1993)

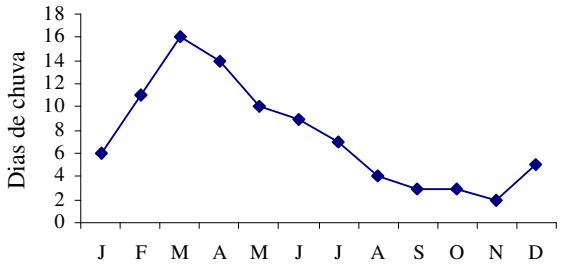


Figura 5.8. Dias de chuva na RMF (FUNCEME, 1974-1993)

5.3 Dados gerais de alguns trechos desta pesquisa

A título ilustrativo serão apresentados dados das rodovias CE-40 e CE-060, que por suas localizações geográficas e tipos de solos, se constituem numa amostra significativa dos

trechos estudados da RMF. Estes dados foram obtidos na dissertação de mestrado do autor da presente pesquisa (BENEVIDES, 2000).

5.3.1 Determinação do número N de projeto

O número N (número de repetições do eixo simples padrão de 8,2 tf) foi obtido em função das contagens de tráfego nos respectivos segmentos, das taxas de crescimento (t%), períodos de projeto (P), fator climático regional (FR) e fator de veículos (FV), conforme Tabela 5.2. Os trechos escolhidos na CE-060 e na CE-040, seguem metodologia do DERT-CE que mantém 12 postos de contagens em todo o estado do Ceará. A composição da frota de veículos nas rodovias estaduais pavimentadas, adotada como padrão para os trechos deste estudo, foi a citada no Capítulo 2, considerando a média para as rodovias.

Tabela 5.2 Determinação do número N de projeto de trechos da RMF

Trecho	P (anos)	VMDc	t (%)	FR	FV	N
060ECE0030/70 - Pajuçara-Pacatuba	10	560	2,0	1,4	1,30	$3{,}74 \times 10^6$
040ECE0030/90 - Messejana-Aquiraz	10	850	5,0	1,0	1,90	$7{,}43 \times 10^6$

5.3.2 Características físicas, de projeto, dos revestimentos asfálticos e das camadas granulares

Nas camadas de revestimento (capa e camada de ligação), foram efetuados ensaios de caracterização, sendo estabelecidos os parâmetros: teor de betume (TB), volume de vazios (V), relação betume vazios (RBV), estabilidade (F), fluência (Fl) e peso específico (P). Os resultados são apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3 Características físicas de projeto das capas de trechos da RMF

Trecho	**R**	**Faixa**	**TB (%)**	**V (%)**	**RBV (%)**	**E (kgf)**	**Fl (1/100")**	**P (kgf/m^3)**
060ECE0030/70 - Pajuçara-Pacatuba	CBUQ	C	5,4	4,2	70	430	13	2326
040ECE0030/90 - Messejana-Aquiraz	CBUQ	C	6,3	4,5	75	600	13,	2330

Tabela 5.4 Características físicas da camada de ligação de trechos da RMF

Trecho	**R**	**Faixa**	**TB (%)**	**V (%)**	**RBV (%)**	**E (kgf)**	**Fl (1/100")**	**P (kgf/m^3)**
040ECE0030/90 - Messejana-Aquiraz	PMQ	B	4,0	4,6	69	400	13	2290

Obs: O trecho Pajuçara-Pacatuba foi dimensionado sem camada de ligação.

A caracterização física das camadas granulares (base, sub-base e subleito) foi estabelecida em função da composição, da energia de compactação (En), modificada (M), intermodificada (IM), intermediária (I) e normal (N), do Limite de Liquidez (LL), do Índice de Plasticidade (IP), da expansão (Ex) e da umidade ótima (Hot). Os resultados estão indicados nas Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7.

Tabela 5.5 Características físicas de projeto das bases de trechos da RMF

Trecho	Composição	F	CBR (%)	En	P (kgf/m^3)	LL (%)	IP (%)	Ex (%)	Hot (%)
060ECE0030/70 - Pajuçara-Pacatuba	Solo-brita (60-40)%	D	84,5	IM	2048	NL	NP	-	4,40
040ECE0030/90 - Messejana-Aquiraz	Solo-brita (40-60)%	D	135	M	2180	NL	NP	-	7

Tabela 5.6 Características físicas de projeto das sub-bases de trechos da RMF

Trecho	Composição	CBR (%)	En	M kgf/m^3)	LL (%)	IP (%)	Ex (%)	Hot (%)
060ECE0030/70 - Pajuçara-Pacatuba	S/ mistura	54	I	2080	NL	NP	0,10	5,50
040ECE0030/90 - Messejana-Aquiraz	S/ mistura	58	I	1980	NL	NP	0,20	7,30

Tabela 5.7 Características físicas dos subleitos de trechos da RMF

Trecho	CBR (%)	En	M (kgf/m^3)	LL (%)	IP (%)	Ex (%)	Hot (%)
060ECE0030/70 - Pajuçara-Pacatuba	9	PN	1.803	42,10	11,90	0,70	10,80
040ECE0030/90 - Messejana-Aquiraz	8	PN	1.949	29,50	8,90	0,60	9,60

5.4 Levantamentos efetuados nos trechos desta pesquisa

Durante a presente pesquisa foram efetuados os seguintes levantamentos de campo:

a) Levantamento visual contínuo.

b) Coleta dos dados originados das opiniões de técnicos especialistas, para a geração do modelo probabilístico de Markov.

c) Levantamento das irregularidades longitudinais e afundamentos, feitas com equipamento a laser.

5.4.1 Procedimentos e resultados do levantamento visual contínuo – LVC

Foi efetuado em 2005 o LVC dos 72 trechos escolhidos neste estudo. A operação foi efetuada conforme procedimento a seguir descrito. O LVC foi realizado em apenas uma

das faixas de tráfego, sendo escolhida para ser inventariada a de pior condição. Em se tratando de pista dupla, foi levantada cada pista independentemente.

Inicialmente é identificado o início e o final da ocorrência de cada defeito, registrando em equipamento adequado. Caso não seja percebido o início de um defeito e o mesmo venha a ser verificado posteriormente, deverá ser registrado em fichas manuais e, em escritório será feita a inserção no arquivo de dados. Para aumentar a precisão dos levantamentos, é obrigatório que seja zerado o hodômetro e fechado o arquivo quando forem encontrados os marcos intermediários (aproximadamente a cada 5 km).

A equipe de campo é composta de um Engenheiro, de um Técnico (Motorista) treinado em levantamentos de baixa velocidade e em segurança, e em alguns trechos deste levantamento o autor desta pesquisa esteve presente, tendo sido utilizados os seguintes equipamentos:

- 1 (um) Veículo de passeio devidamente equipado com instrumentos adequados para o LVC, conforme mostrado na Figura 4.4, com boa visibilidade, ou seja, o corpo do veículo não dificulta a definição e a localização dos defeitos;
- 1 (um) Hodômetro digital de precisão, com erro inferior a 0,5%;
- 1 (um) Giroflex (sinalizador luminoso);
- 1 (um) Notebook comum;
- Croquis dos trechos

Uso do *Software*

O veículo é posicionado no início do trecho a ser cadastrado. Primeiramente deve-se ligar o inversor, em seguida acionar a chave que redireciona a energia para a tomada do veículo. O hodômetro digital é ligado primeiramente na energia, depois no conector que recebe os pulsos, só então, deverá ser ligado o cabo do hodômetro digital na saída paralela do *notebook,* que por sua vez, deverá ser fixado ao veículo acoplado a um coletor de dados e, então, ligado. Para a utilização do sistema, é dado um duplo *click* no ícone LVC na tela inicial do Windows. O programa abre a tela inicial apresentada na Figura 5.9. Esta tela apresentará vários botões. Deverá ser apertado o botão "**trecho a ser inventariado**" o qual abrirá a próxima tela do sistema, Figura 5.10.

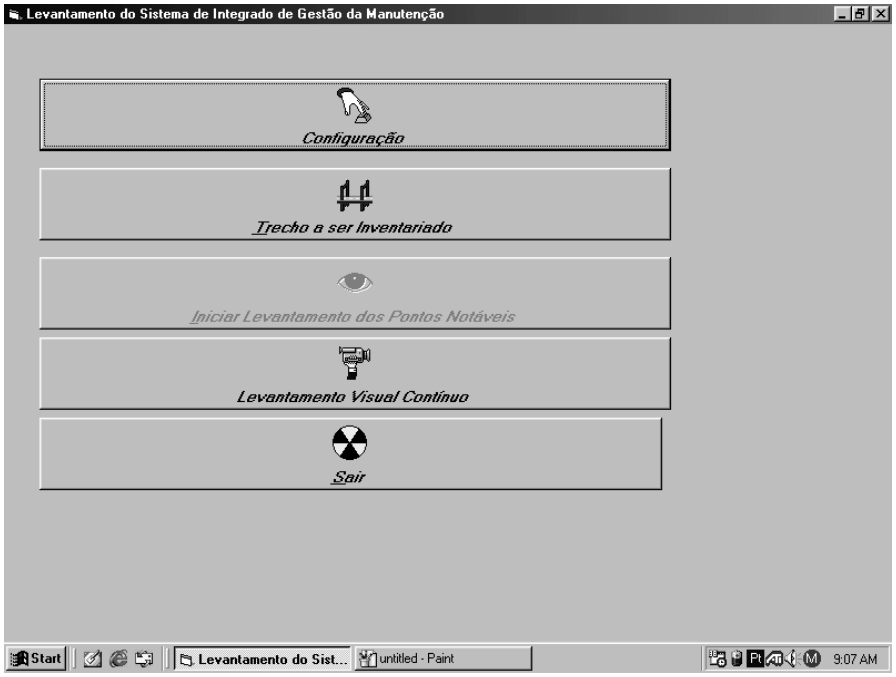


Figura 5.9 Tela inicial para o LVC

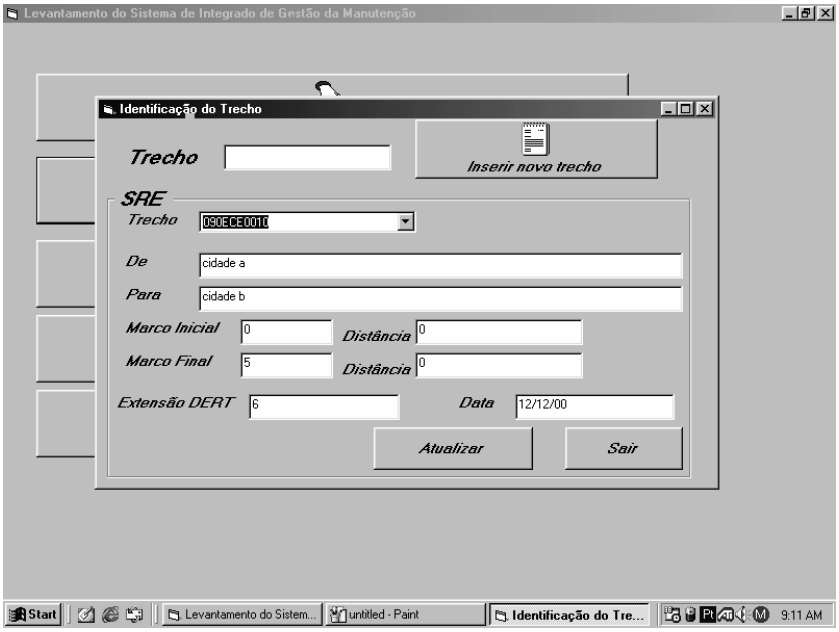


Figura 5.10 Tela de identificação do trecho para o LVC

Nesta tela é escolhido o trecho a ser inventariado e acionado o botão "**sair**". O sistema retornará à tela inicial, Figura 5.9, onde deverá ser acionado o botão "**levantamento visual contínuo**". A tela mostrada na Figura 5.11, aparece no visor e o levantamento é iniciado.

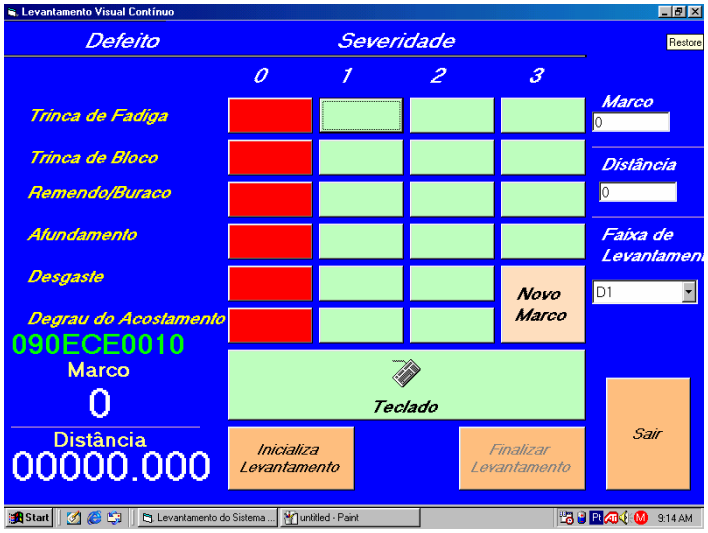


Figura 5.11 Exemplo de tela de início do levantamento de um dos trechos escolhidos (090ECE0010) nesta pesquisa

Primeiramente é indicada a faixa de levantamento. Se necessário, é digitado o número do marco e a distância de início; este procedimento é utilizado quando do reinício de um levantamento. Aciona-se o botão "**iniciar levantamentos**" e em seguida libera-se o coletor de dados dando um *click* no botão "**teclado**".

Neste momento é realizado o levantamento, sendo indicados o defeito e a severidade no coletor de dados. Ao final deverá ser acionado o botão "**finalizar levantamento**".

Depois de anotadas as quantidades de defeitos, o sistema é alimentado através de tabelas em formatos pré-definidos. Essas quantidades são importadas na forma de extensão de cada defeito, sendo as mesmas posteriormente transformadas em percentuais padronizados, adotando-se "pesos" para cada defeito e cada severidade. Assim, se, por exemplo, tem-se uma trinca de fadiga de severidade 1, é aplicado o Fator de Equivalência (peso) 0,05. Os percentuais de cada severidade são somados, obtendo-se o percentual padrão do respectivo defeito. O mesmo ocorre para todos os defeitos. O Fator de Equivalência de Defeitos, transforma vários defeitos/severidades em defeitos equivalentes, ou seja, a extensão de cada defeito/severidade é ponderada por um fator correspondente arbitrado, chamado de Fator de Equivalência de Defeito.

O resultado desta operação gera o Defeito Padrão, equação 5.1.

$$\text{Defeito Padrão 1 (\%)} = \frac{\sum_{n=1,2,3} \text{Sev.n do Defeito 1} \times \text{fator da Sev. do Defeito 1}}{\text{Extensão do Total do Trecho}} \times 100 \qquad (5.1)$$

A seguir são mostrados dois exemplos do cálculo realizado pelo sistema para chegar aos percentuais padrões dos defeitos.

O primeiro é o trecho 060ECE0050D (ENTRONCAMENTO CE-251 p/ MARACANAÚ-ENTRONCAMENTO CE-350 (A) (MUNGUBA)), com extensão de 5.809m, conforme Tabela 5.8.

O segundo é o trecho 085ECE0030D (ENTRONCAMENTO LESTE p/ CAUCAIA - ENTRONCAMENTO CE-090), com extensão de 1.483m, no qual predominam trincas de fadiga e remendos, sendo a maioria em um ponto localizado próximo ao final, mostrado na Tabela 5.9. O cálculo é análogo para os outros defeitos.

Tabela 5.8 Determinação da % Padrão de Defeitos do trecho 060ECE0050D

DEFEITO	SEVERIDADE	EXT. (m)	FATOR DE EQUIVALÊNCIA DE DEFEITOS	%PADRÃO DEFEITOS
Trinca de Fadiga	0	4933	0	0,0
Trinca de Fadiga	1	127	0,05	0,1
Trinca de Fadiga	2	283	0,5	2,4
Trinca de Fadiga	3	466	1	8,0
Trinca de Bloco	0	5804	0	0,0
Trinca de Bloco	1	1	0,05	0,0
Trinca de Bloco	2	4	0,4	0,0
Trinca de Bloco	3	0	0,7	0,0
Remendo	0	5790	0	0,0
Remendo	1	0	0	0,0
Remendo	2	1	0,4	0,0
Remendo	3	18	1	0,3
Afundamento	0	5608	0	0,0
Afundamento	1	189	0,05	0,2
Afundamento	2	12	0,3	0,1
Afundamento	3	0	1	0,0
Desgaste	0	5809	0	0,0
Desgaste	1	0	0,05	0,0
Desgaste	2	0	1	0,0

No exemplo da Tabela 5.8, observa-se a predominância de trincas de fadiga de alta severidade no trecho. O percentual padrão da trinca de fadiga é o somatório dos percentuais das severidades 1, 2 e 3, ou seja, neste caso, 0,1% +2,4% +8,0% = 10,5%.

Tabela 5.9 Determinação da % Padrão de Defeitos do trecho 085ECE0030D

DEFEITO	SEVERIDADE	EXT. (m)	FATOR DE EQUIVALÊNCIA	% PADRÃO DEFEITOS
Trinca de Fadiga	0	553	0	0,0
Trinca de Fadiga	1	50	0,05	0,2
Trinca de Fadiga	2	443	0,5	15,0
Trinca de Fadiga	3	435	1	29,4
Trinca de Bloco	0	1481	0	0,0
Trinca de Bloco	1	0	0,05	0,0
Trinca de Bloco	2	0	0,4	0,0
Trinca de Bloco	3	0	0,7	0,0
Remendo	0	668	0	0,0
Remendo	1	15	0	0,0
Remendo	2	561	0,4	15,2
Remendo	3	237	1	16,0
Afundamento	0	1251	0	0,0
Afundamento	1	0	0,05	0,0
Afundamento	2	93	0,3	1,9
Afundamento	3	137	1	9,3
Desgaste	0	1427	0	0,0
Desgaste	1	0	0,05	0,0
Desgaste	2	54	1	3,6%

Para o exemplo 2, Tabela 5.9, utilizando como exemplo de cálculo o remendo, temos:
% Padrão = 0,0% +15,2% + 16,0% = 31,2%.
E utilizando como exemplo de cálculo a trinca de fadiga, temos:
% Padrão = 0,2% +15,0% + 29,4% = 44,6%.

Critérios adotados para estabelecimento dos Conceitos pelo LVC

Efetuados os cálculos, verifica-se na Tabela 5.10, os conceitos atribuídos para os trechos em função dos critérios estabelecidos para cada tipo de defeito e do tráfego médio ou baixo. Prepondera o pior conceito. Nos casos acima, para o trecho 060ECE0050D, tráfego médio, trinca de fadiga 10,5%, conceito Bom. Para o trecho 085ECE0030D, tráfego baixo, para o remendo 31,2% , conceito Péssimo e para a trinca de fadiga 44,6%, conceito Ruim, prepondera o conceito Péssimo.

A Tabela 5.11 apresenta os resultados e os conceitos do LVC dos 72 trechos estudados nesta pesquisa no ano de 2005.

Tabela 5.10 Conceitos de tráfego e de defeitos pelo LVC admitidos no SIGMA do DERT e usados nesta pesquisa

Código do Tipo de Defeito SGP	Código Conceito de Tráfego	Conceito de Defeito	Mínimo	Máximo	Conceito
Afundamento	Médio	Pouco Afundado	0	8	Bom
		Razoavelmente Afundado	8	20	Regular
		Muito Afundado	20	40	Ruim
		Excessivamente Afundado	40	100	Péssimo
	Baixo	Pouco Afundado	0	5	Bom
		Razoavelmente Afundado	5	15	Regular
		Muito Afundado	15	35	Ruim
		Excessivamente Afundado	35	100	Péssimo
Desgaste	Médio	Pouco Desgastado	0	8	Bom
		Razoavelmente Desgastado	8	35	Regular
		Muito Desgastado	35	60	Ruim
		Excessivamente Desgastado	60	100	Péssimo
	Baixo	Pouco Desgastado	0	5	Bom
		Razoavelmente Desgastado	5	30	Regular
		Muito Desgastado	30	45	Ruim
		Excessivamente Desgastado	45	100	Péssimo
Remendo	Médio	Pouco Remendado	0	6	Bom
		Razoavelmente Remendado	6	17	Regular
		Muito Remendado	17	32	Ruim
		Excessivamente Remendado	32	100	Péssimo
	Baixo	Pouco Remendado	0	5	Bom
		Razoavelmente Remendado	5	15	Regular
		Muito Remendado	15	30	Ruim
		Excessivamente Remendado	30	100	Péssimo
Tr. de Bloco	Médio	Pouco Trincado	0	15	Bom
		Razoavelmente Trincado	15	50	Regular
		Muito Trincado	50	70	Ruim
		Excessivamente Trincado	70	100	Péssimo
	Baixo	Pouco Trincado	0	10	Bom
		Razoavelmente trincado	10	45	Regular
		Muito Trincado	45	60	Ruim
		Excessivamente Trincado	60	100	Péssimo
Tr. de Fadiga	Médio	Pouco Trincado	0	15	Bom
		Trincado	15	32	Regular
		Muito Trincado	32	60	Ruim
		Excessivamente Trincado	60	100	Péssimo
	Baixo	Pouco Trincado	0	12	Bom
		Trincado	12	30	Regular
		Muito Trincado	30	50	Ruim
		Excessivamente Trincado	50	100	Péssimo

Tabela 5.11 Resultados do LVC e conceitos dos trechos escolhidos para esta pesquisa na RMF em 2005

Código do Trecho	Origem-Destino	Ext. (m)	Revestimento		Defeitos 2005					Conc.
			Tipo	Ano	TF	TB	RM	AF	DES	
025ECE0010D	ENTR CE-040 (FORT.) - ENTR CE-506 p/ COF.	6335	CBUQ	1995	7	2	1	0	0	Bom
025ECE0010E	ENTR CE-040 (FORT.) - ENTR CE-506 p/ COF.	6335	CBUQ	1995	7	2	1	0	0	Bom
025ECE0030D	ENTR CE-506 p/ COF. - PORTO DAS DUNAS	6988	AAUQ	1995	15	4	0	0	0	Regular
025ECE0030E	ENTR CE-506 p/ COF. - PORTO DAS DUNAS	6988	AAUQ	1995	15	4	0	0	0	Regular
025ECE0050D	PORTO DAS DUNAS – ENT CE-452 PRAINHA	5072	AAUQ	1995	0	0	0	0	0	Bom
025ECE0050E	PORTO DAS DUNAS – ENT CE-452 PRAINHA	5072	AAUQ	1995	0	0	0	0	0	Bom
040ECE0010D	FORTALEZA (AV. Pe. ANTÔNIO THOMAZ)-ENTR.CE-025	6940	CBUQ	1995	1	3	2	0	0	Bom
040ECE0010E	FORTALEZA(AV. Pe. ANTÔNIO THOMAZ)-ENTR.CE-025	6907	CBUQ	1998	3	0	0	0	0	Bom
040ECE0030D	ENTR.CE-025-MESSEJANA	2460	CBUQ	1998	0	0	0	0	0	Bom
040ECE0030E	ENTR.CE-025-MESSEJANA	2451	CBUQ	1998	0	0	0	0	0	Bom
040ECE0050D	MESSEJANA-ANEL RODOVIÁRIO	4294	CBUQ	1998	0	0	0	0	0	Bom
040ECE0050E	MESSEJANA-ANEL RODOVIÁRIO	4335	CBUQ	1998	0	0	0	0	0	Bom
040ECE0070D	ANEL ROD.-ENTR.CE-251 (EUSÉBIO)	5310	CBUQ	2003	0	0	0	0	0	Bom
040ECE0070E	ANEL ROD.-ENTR.CE-251 (EUSÉBIO)	5302	CBUQ	2003	1	1	0	0	0	Bom
040ECE0090D	ENT..CE-251 EUSÉBIO - ENTR.CE-527 p/ AQUIRAZ (NORTE)	3869	CBUQ	2003	1	1	0	0	0	Bom
040ECE0090E	ENT.CE-251 EUSÉBIO - ENTR.CE-527 p/ AQUIRAZ (NORTE)	3907	CBUQ	2003	0	1	0	0	0	Bom
040ECE0110D	ENT.CE-527 AQUIRAZ (N)-ENTR.CE-452 (AQUIRAZ) (SUL)	2533	CBUQ	2003	0	0	0	0	0	Bom
040ECE0110E	ENT.CE-527 AQUIRAZ (N)-ENTR.CE-452 (AQUIRAZ) (SUL)	2511	CBUQ	2003	0	0	0	0	0	Bom
040ECE0130D	ENT.CE-452 AQUIRAZ (SUL)-ENTR.CE-453 (FACUNDES)	6488	CBUQ	2004	0	2	0	0	0	Bom
040ECE0130E	ENT.CE-452 AQUIRAZ (SUL)-ENTR.CE-453 (FACUNDES)	6488	CBUQ	2004	0	2	0	0	0	Bom
040ECE0150D	ENT.CE-453 (FACUNDES)-ENT.CE-454 PINDORETAMA	9131	CBUQ	2004	1	4	0	0	0	Bom
040ECE0150E	ENT.CE-453 (FACUNDES)-ENT.CE-454 PINDORETAMA	9131	CBUQ	2004	1	4	0	0	0	Bom
040ECE0170D	ENTR.CE-454 PINDOR. - ENT.CE-350 COLUNA	9940	CBUQ	2004	0	1	0	0	0	Bom
040ECE0170E	ENTR.CE-454 PINDOR. - ENT.CE-350 COLUNA	9940	CBUQ	2004	0	1	0	0	0	Bom
060ECE0010D	MONDUBIM (AV. PERIMETRAL)-ANEL RODOVIÁRIO	3838	CBUQ	1998	14	1	0	0	1	Regular
060ECE0010E	MONDUBIM (AV. PERIMETRAL)-ANEL RODOVIÁRIO	3829	CBUQ	1998	8	1	0	0	0	Bom

Tabela 5.11 Resultados do LVC e conceitos dos trechos escolhidos para esta pesquisa na RMF em 2005

Código do Trecho	Origem-Destino	Ext. (m)	Revestimento		Defeitos 2005					Conc.
			Tipo	Ano	TF	TB	RM	AF	DES	
060ECE0030D	ANEL RODOVIÁRIO-ENTR.CE-251 p/ MARACANAÚ	3806	CBUQ	1995	8	4	3	0	0	Bom
060ECE0030E	ANEL RODOVIÁRIO-ENTR.CE-251 p/ MARACANAÚ	3778	CBUQ	1995	6	1	2	0	1	Bom
060ECE0050D	ENTR.CE-251 p/ MARACANAÚ-ENTR.CE-50 (A) (MUNGUBA)	5809	CBUQ	1998	11	1	0	1	0	Bom
060ECE0050E	ENTR.CE-251 p/ MARACANAÚ-ENTR.CE-50 (A) (MUNGUBA)	5819	CBUQ	1998	7	1	1	1	1	Bom
060ECE0070D	ENTR.CE-350 (A) (MUNGUBA)- ENTR.CE-350(B) (PACATUBA)	6257	CBUQ	1998	4	1	0	0	1	Bom
060ECE0070E	ENTR.CE-350 (A) (MUNGUBA)-ENTR.CE-350 (B) (PACATUBA)	6204	CBUQ	1998	4	1	0	0	1	Bom
060ECE0090D	ENTR.CE-350 (B) (PACATUBA)-ACS. SUL p/ PACATUBA	1950	CBUQ	1998	1	0	1	0	1	Bom
060ECE0090E	ENTR.CE-350(B) (PACATUBA)-ENTR. SUL p/ PACATUBA	1974	CBUQ	1998	5	0	0	1	5	Regular
060ECE0110D	ENTR. SUL PACAT.-GUAIÚBA	5267	CBUQ	1998	9	1	4	0	0	Bom
060ECE0110E	ENTR. SUL PACAT.-GUAIÚBA	5267	CBUQ	1998	9	1	4	0	0	Bom
060ECE0130D	GUAIÚBA-ENT.CE-354 A	15865	CBUQ	1998	13	1	1	0	0	Regular
060ECE0130E	GUAIÚBA-ENT.CE-354 A	15865	CBUQ	1998	13	1	1	0	0	Regular.
060ECE0150D	ENTR.CE-354 (A)-ENTR.CE-253 (A) /354 (B) (ACARAPE)	6921	CBUQ	1998	16	1	2	0	0	Regular
060ECE0150E	ENTR.CE-354 (A)-ENTR.CE-253 (A) /354 (B) (ACARAPE)	6921	CBUQ	1998	16	1	2	0	0	Regular
065ECE0010D	SIQUEIRA (AV. PER.)-ANEL RODOVIÁRIO	316	CBUQ	1998	15	4	10	0	0	Regular
065ECE0010E	SIQUEIRA (AV. PER.)-ANEL RODOVIÁRIO	316	CBUQ	1998	15	4	10	0	0	Regular
065ECE0030D	ANEL ROD.-ENTR.CE-251 JAÇANAÚ	3564	CBUQ	1998	13	1	1	0	0	Regular
065ECE0030E	ANEL ROD.-ENTR.CE-251 JAÇANAÚ	3597	CBUQ	1998	6	1	1	0	0	Bom
065ECE0050D	ENTR.CE-251 (JAÇANAÚ)-ENTR.CE-350 (MARANGUAPE)	6835	CBUQ	1998	3	1	0	0	0	Bom
065ECE0050E	ENTR.CE-251 (JAÇANAÚ)-ENTR.CE-350 (MARANGUAPE	6861	CBUQ	1998	0	3	0	0	0	Bom
085ECE0030D	ENT.LESTE CAUCAIA – ENT. CE-090	1483	TSD	1995	45	0	31	4	11	Péssimo.
085ECE0030E	ENT.LESTE CAUCAIA – ENT. CE-090	1483	TSD	1995	48	0	27	5	12	Péssimo.
085ECE0050D	ENTR CE-090 - ENTR CE-531 p/ ICARAÍ	1956	TSD	1995	8	1	1	0	0	Bom
085ECE0050E	ENTR CE-090 - ENTR CE-531 p/ ICARAÍ	1956	TSD	1995	8	1	1	0	0	Bom
085ECE0070D	ENTR CE-531 p/ ICARAÍ - ENTR CE-544 (TAB. GRANDE)	14728	TSD	1995	4	0	1	0	0	Bom
085ECE0070E	ENTR CE-531 p/ ICARAÍ - ENTR CE-544 (TAB. GRANDE)	14728	TSD	1995	4	0	1	0	0	Bom
085ECE0090D	ENTR CE-544 (TAB. GRANDE) - ENTR CE-348 (COITÉ)	8337	TSD	1995	3	1	1	0	0	Bom

Tabela 5.11 Resultados do LVC e conceitos dos trechos escolhidos para esta pesquisa na RMF em 2005

Código do Trecho	Origem-Destino	Ext. (m)	Revestimento		Defeitos 2005					Conc.
			Tipo	Ano	TF	TB	RM	AF	DES	
085ECE0090E	ENTR CE-544 (TAB. GRANDE) - ENTR CE-348 (COITÉ)	8337	TSD	1995	3	1	1	0	0	Bom
085ECE0110D	ENTR CE-348(COITÉ) - ENTR CE-422	4392	TSD	1995	2	0	1	0	0	Bom
085ECE0110D	ENTR CE-348(COITÉ) - ENTR CE-422	4392	TSD	1995	2	0	1	0	0	Bom
085ECE0130D	ENTR CE-422 - ENTR CE-156 (ACENDE CANDEIA	6628	TSD	1995	2	0	2	0	0	Bom
085ECE0130D	ENTR CE-422 - ENTR CE-156 (ACENDE CANDEIA)	6628	TSD	1995	2	0	2	0	0	Bom
085ECE0150D	ENTR CE-156 (ACENDE CANDEIA) - ENTR CE-423 (SÃO GONÇALO DO AMARANTE)	8658	TSD	1995	20	0	6	0	0	Regular
085ECE0150E	ENTR CE-156 (ACENDE CANDEIA) - ENTR CE-423 (SÃO GONÇALO DO AMARANTE)	8658	TSD	1995	20	0	6	0	0	Regular
085ECE0170D	ENTR CE-423 (SÃO G. DO AMAR.) ENTR CE-341(QUATRO BOCAS)	14291	TSD	1995	1	0	0	0	0	Bom
085ECE0170E	ENTR CE-423 (SÃO G. DO AMAR.) ENTR CE-341(QUATRO BOCAS)	14291	TSD	1995	1	0	0	0	0	Bom
090ECE0010D	ENTR CE-085 - ENTR CE-531 (ICARAÍ)	7244	TSD	1994	51	2	16	0	1	Ruim
090ECE0010E	ENTR CE-085 - ENTR CE-531 (ICARAÍ)	7244	TSD	1994	51	2	16	0	1	Ruim
341ECE0010D	ENTR CE-348 (PARAC. – ENTR CE-085 (Q. BOCAS)	11561	AAUQ	1995	0	38	1	0	0	Regular
341ECE0010E	ENTR CE-348 (PARAC. –ENTR CE-085 (Q.BOCAS)	11561	AAUQ	1995	0	38	1	0	0	Regular
341ECE0030D	ENT CE-085 (QUATRO BOCAS) - ENT CE-426	4434	AAUQ	1995	0	6	0	0	0	Bom
341ECE0030E	ENT CE-085 (QUATRO BOCAS) - ENT CE-426	4434	AAUQ	1995	0	6	0	0	0	Bom
341ECE0050D	ENTR CE-426 - ENTR BR-222 (CROATÁ)	12565	AAUQ	1995	0	5	0	0	0	Bom
341ECE0050E	ENTR CE-426 - ENTR BR-222 (CROATÁ)	12565	AAUQ	1995	0	5	0	0	0	Bom
341ECE0070D	ENTR.BR-222 (CROATÁ)-ENTR. CE-162/354 (PENTECOSTE)	20903	TSD	2004	0	0	0	0	0	Bom
341ECE0070E	ENTR.BR-222 (CROATÁ)-ENTR. CE-162/354 (PENTECOSTE)	20903	TSD	2004	0	0	0	0	0	Bom

5.4.2 Resultados dos dados dos trechos originados das opiniões de técnicos especialistas

Para permitir o desenvolvimento da curva de desempenho pelo modelo probabilístico de Markov, foi estabelecido que a análise fosse feita considerando o ano zero de avaliação da condição atual do pavimento, no caso, 2005. Portanto, a curva de desempenho a ser

obtida, vai mostrar o ciclo de vida a partir da condição atual do trecho até uma projeção para os próximos dez anos.

Sendo assim, o vetor estado inicial, P(o), para cada trecho varia de acordo com a condição atual, podendo ter várias formas, tais como: P(o) = (0,9; 0,1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0), ou P(o) = (0,0; 0,8; 0,2; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0). A primeira coluna indica a probabilidade de um trecho apresentar ICP entre 100 e 90, a segunda indica a probabilidade de um trecho apresentar ICP entre 90 e 80 e assim por diante.

As determinações das matrizes de probabilidade de transição dos trechos desta pesquisa foram estimadas utilizando, além dos dados históricos de desempenho dos pavimentos, dados tirados da opinião de especialistas locais capazes de prever as necessidades futuras e estão também relacionadas com o volume de tráfego. A Tabela 5.12 mostra o formulário utilizado para a avaliação da condição atual dos trechos em função do ICP, calculado pelo vetor estado inicial. Na Tabela 5.13 é apresentada a correspondência entre os conceitos de condição dos pavimentos e a escala do ICP, variando de péssimo a ótimo e as correspondentes estratégias de M&R adotadas. A título comparativo, a Figura 5.12 mostra a avaliação da condição (ICP) como um indicador geral do tipo de intervenção.

Tabela 5.12 Formulário para avaliação do ICP

AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO ATUAL DOS TRECHOS ESCOLHIDOS										
Trecho:										
Extensão:										
Ano de Construção:										
Avaliador: Data:										
Vetor estado inicial P (o)										
Probabilidade										
Média	95	85	75	65	55	45	35	25	15	5
Resultados										
ICP P(o) 2005	= Σ dos resultados									
Conceito										

Figura 5.12 Avaliação da condição (ICP) como um indicador geral do tipo de intervenção

Tabela 5.13 Conceito do ICP em função da escala de valores e estratégias de M&R

ÍNDICE DE CONDIÇÃO DO PAVIMENTO		ESTRATÉGIA DE M&R
ESCALA	CONCEITO	
0 – 20	Péssimo	Reconstrução
20 – 40	Ruim	Restauração
40 – 50	Regular	Recapeamento grosso
50 – 60	Regular	Recapeamento fino
60 – 80	Bom	Lama, Capa Selante ou Micro revestimento.
80 – 90	Muito bom	Manutenção de Rotina
90 – 100	Ótimo	Nada a Fazer

A hipótese admitida na composição das matrizes de transição considera que não há mais do que uma alteração no estado de condição dos pavimentos de um ano para outro, ou seja, durante um ciclo de solicitação. Nas matrizes, a primeira linha apresenta as probabilidades de permanecer na condição inicial ou passar para outro estado de condição inferior, após o primeiro ciclo e assim sucessivamente nas demais linhas. Portanto, para cada um dos dez estados de condição, como neste estudo, só há necessidade de preencher as duas diagonais centrais, com os respectivos valores das probabilidades de uma seção permanecer ou passar para outro estado imediatamente inferior durante um ciclo de solicitação.

Nos setenta e dois trechos deste estudo, temos três (3) tipos de revestimento: concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ, areia asfalto usinado a quente - AAUQ e tratamento superficial duplo - TSD. A opinião de cinco especialistas foi que houvesse uma matriz de transição para cada revestimento, variando apenas o vetor estado inicial dos respectivos trechos. Nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15, são mostradas as matrizes de transição para os revestimentos em CBUQ, AAUQ e TSD, respectivamente.

$$P = \begin{vmatrix} 0.85 & 0,15 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,80 & 0,20 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,80 & 0,20 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,70 & 0,30 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,70 & 0,30 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,60 & 0,40 & 0,00 & 0,10 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,60 & 0,40 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,60 & 0,40 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,50 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{vmatrix}$$

Figura 5.13 Matriz de transição para os revestimentos em CBUQ

$$P = \begin{vmatrix} 0,80 & 0,20 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,80 & 0,20 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,70 & 0,30 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,70 & 0,30 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,60 & 0,40 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,60 & 0,40 & 0,00 & 0,10 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,50 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,50 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,50 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{vmatrix}$$

Figura 5.14 Matriz de transição para os revestimentos em AAUQ

$$P = \begin{vmatrix} 0,75 & 0,25 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,75 & 0,25 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,70 & 0,30 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,70 & 0,30 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,60 & 0,40 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,60 & 0,40 & 0,00 & 0,10 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,50 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,50 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,50 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{vmatrix}$$

Figura 5.15 Matriz de transição para os revestimentos em TSD

A Tabela 5.14 apresenta os valores do vetor estado inicial e do ICP P(o) pelo processo de Markov dos 72 trechos escolhidos.

Tabela 5.14 Vetor estado inicial e valores do ICP inicial P (o) pelo Processo de Markov dos trechos escolhidos nesta pesquisa

Trecho	Tipo Rev,	Vetor estado inicial P (o)										ICP P (o)
01-025ECE0010D	CBUQ	0,00	0,00	0,80	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	73,00
02-025ECE0010E	CBUQ	0,00	0,00	0,90	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	74,00
03-025ECE0030D	AAUQ	0,00	0,00	0,30	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	68,00
04-025ECE0030E	AAUQ	0,00	0,00	0,30	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	68,00
05-025ECE0050D	AAUQ	0,10	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	86,00
06-025ECE0050E	AAUQ	0,15	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	86,50
07-040ECE0010D	CBUQ	0,00	0,55	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,50
08-040ECE0010E	CBUQ	0,00	0,80	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	83,00
09-040ECE0030D	CBUQ	0,15	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	86,50
10-040ECE0030E	CBUQ	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,00
11-040ECE0050D	CBUQ	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	92,00
12-040ECE0050E	CBUQ	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	92,00
13-040ECE0070D	CBUQ	0,80	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	93,00
14-040ECE0070E	CBUQ	0,80	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	93,00

Tabela 5.14 Vetor estado inicial e valores do ICP inicial P (o) pelo Processo de Markov dos trechos escolhidos nesta pesquisa

Trecho	Tipo Rev,	Vetor estado inicial P (o)										ICP P (o)
15-040ECE0090D	CBUQ	0,20	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87,00
16-040ECE0090E	CBUQ	0,20	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91,00
17-040ECE0110D	CBUQ	0,00	0,90	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	84,00
18-040ECE0110E	CBUQ	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,00
19-040ECE0130D	CBUQ	0,65	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91,50
20-040ECE0130E	CBUQ	0,65	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91,50
21-040ECE0150D	CBUQ	0,65	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91,50
22-040ECE0150E	CBUQ	0,65	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91,50
23-040ECE0170D	CBUQ	0,65	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91,50
24-040ECE0170E	CBUQ	0,65	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91,50
25-060ECE0010D	CBUQ	0,00	0,20	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77,00
26-060ECE0010E	CBUQ	0,00	0,60	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	81,00
27-060ECE0030D	CBUQ	0,00	0,10	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,00
28-060ECE0030E	CBUQ	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,00
29-060ECE0050D	CBUQ	0,00	0,65	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	81,50
30-060ECE0050E	CBUQ	0,00	0,65	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	81,50
31-060ECE0070D	CBUQ	0,00	0,85	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	83,50
32-060ECE0070E	CBUQ	0,00	0,85	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	83,50
33-060ECE0090D	CBUQ	0,00	0,60	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	81,00
34-060ECE0090E	CBUQ	0,00	0,60	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	81,00
35-060ECE0110D	CBUQ	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	82,00
36-060ECE0110E	CBUQ	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	82,00
37-060ECE0130D	CBUQ	0,00	0,90	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	84,00
38-060ECE0130E	CBUQ	0,00	0,90	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	84,00
39-060ECE0150D	CBUQ	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	82,00
40-060ECE0150E	CBUQ	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	82,00
41-065ECE0010D	CBUQ	0,00	0,00	0,00	0,20	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	57,00
42-065ECE0010E	CBUQ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	47,00
43-065ECE0030D	CBUQ	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	85,00
44-065ECE0030E	CBUQ	0,25	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87,50
45-065ECE0050D	CBUQ	0,25	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87,50
46-065ECE0050E	CBUQ	0,25	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87,50
47-085ECE0030D	TSD	0,00	0,00	0,00	0,85	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	63,50
48-085ECE0030E	TSD	0,00	0,00	0,00	0,20	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	57,00
49-085ECE0050D	TSD	0,00	0,00	0,75	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	72,50
50-085ECE0050E	TSD	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,00
51-085ECE0070D	TSD	0,00	0,10	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,00
52-085ECE0070E	TSD	0,00	0,10	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,00
53-085ECE0090D	TSD	0,00	0,10	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,00
54-085ECE0090E	TSD	0,00	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	72,00
55-085ECE0110D	TSD	0,00	0,10	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,00
56-085ECE0110E	TSD	0,00	0,10	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,00
57-085ECE0130D	TSD	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,00
58-085ECE0130E	TSD	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	75,00
59-085ECE0150D	TSD	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,00
60-085ECE0150E	TSD	0,00	0,00	0,30	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	68,00
61-085ECE0170D	TSD	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,00
62-085ECE0170E	TSD	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,00

Tabela 5.14 Vetor estado inicial e valores do ICP inicial P (o) pelo Processo de Markov dos trechos escolhidos nesta pesquisa

Trecho	Tipo Rev,	Vetor estado inicial P (o)										ICP P (o)
63-090ECE0010D	TSD	0,00	0,00	0,30	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	68,00
64-090ECE0010E	TSD	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,00
65-341ECE0010D	AAUQ	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	82,00
66-341ECE0010E	AAUQ	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	82,00
67-341ECE0030D	AAUQ	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	85,00
68-341ECE0030E	AAUQ	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	85,00
69-341ECE0050D	AAUQ	0,40	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	89,00
70-341ECE0050E	AAUQ	0,40	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	89,00
71-341ECE0070D	TSD	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	85,00
72-341ECE0070E	TSD	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	85,00

5.4.3 Levantamento das irregularidades longitudinais e afundamentos

Para os levantamentos das irregularidades longitudinais e afundamentos, efetuados em três etapas em junho de 2006, foi utilizado um aparelho tipo perfilômetro inercial a laser. Este equipamento foi adquirido pela Rede Cooperativa de Pesquisa em Asfalto, uma iniciativa que conta com o apoio da FINEP/CNPq e Petrobrás, para um projeto de Gerência de Pavimentos, PC – 04, inicialmente em três Universidades do Nordeste. O autor da presente pesquisa está coordenando este projeto através do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

O perfilômetro inercial a laser (marca *Ciberlaser*), é constituído de um sistema de medição dos perfis longitudinal e transversal de pavimentos rodoviários, que realiza suas medições com o auxílio de medidores de distância (veículo-pavimento), sem contato (a laser), medidores de aceleração vertical do veículo (acelerômetros), de um sistema preciso de medição de deslocamento/velocidade. É gerenciado por um sistema micro processado, que coordena a aquisição dos dados e os envia a um computador portátil, em tempo real, através de uma porta do tipo USB.

Desenvolvido no Brasil com componentes importados, o equipamento foi projetado para suprir a necessidade de informação confiável e precisa na medição de Irregularidade de pavimentos rodoviários. Agrega ainda outras possibilidades, entre as quais a medição concomitante do afundamento plástico em trilhas de roda, quando provido de um terceiro sensor.

O sistema é capaz de realizar as medições à freqüência de aproximadamente 1700 medidas por segundo, em cada um dos sensores (trabalhando com 2 módulos a laser e 2

acelerômetros). O sistema, que tem sua operação gerenciada por um computador portátil, pode ser fixado em veículo de passeio comum, facilitando seu transporte.

A velocidade de deslocamento do veículo pode variar durante as medições e não tem um limite superior, o que permite, conforme as condições de segurança, que o levantamento seja realizado a 110 km/h, por exemplo. Entretanto, é recomendado que os levantamentos não sejam realizados a velocidades inferiores a 30 km/h. A barra que suporta os sensores pode ser fixada tanto na parte dianteira, quanto na parte traseira de um veículo qualquer.

A Figura 5.16 ilustra o equipamento e a disposição dos sensores na traseira do veículo. Nesta pesquisa, esta disposição dos sensores será considerada como na posição normal.

Figura 5.16 Ilustrando o equipamento a laser e a disposição dos sensores na traseira do veículo na posição considerada normal

Os módulos laser do sistema funcionam por triangulação, ou seja, um feixe laser de média potência que é apontado perpendicularmente ao pavimento, tem sua posição registrada por um sensor especial, para o qual o reflexo do laser no pavimento é direcionado, conforme Figura 5.17.

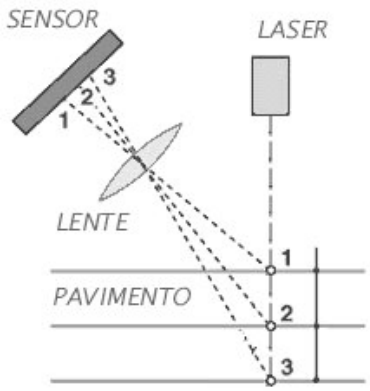


Figura 5.17 Princípios de funcionamento de um módulo laser.

Vantagens do equipamento a laser em relação aos medidores de irregularidade do tipo resposta, SMITR:

- É um sistema de medida primário que mede o perfil do pavimento (similar à medida com nível e mira para os comprimentos de onda que interessam para o cálculo de índices de irregularidade). A irregularidade é calculada *a posteriori* usando-se a equação com a qual se calcula a irregularidade de um trecho medido com nível e mira.
- As medições não são afetadas pela velocidade do veículo, que pode variar durante a medição, entretanto não são recomendadas velocidades inferiores a 30 km/h. Nesta pesquisa, utilizamos diferentes velocidades nos levantamentos do IRI, variando entre 30 e 110 km/h, para testar a assertiva acima.
- As medidas independem de trechos de calibração. O que é calibrado num perfilômetro a laser são os sensores a laser e os acelerômetros, sendo que tal calibração pode ser facilmente checada, antes do início de cada levantamento, como será explicado mais adiante.
- As medidas de irregularidade podem ser feitas sobre as trilhas de roda, o que normalmente não acontece em um medidor tipo resposta, que está atrelado a um eixo de veículo de passeio.
- O sistema gera medidas de irregularidade independentes em cada uma das trilhas de roda.

- O registro do perfil do pavimento é útil na determinação dos locais, dentro de cada trecho, nos quais se encontram as deformações causadoras de irregularidades, permitindo correções mais pontuais.
- A localização posterior dos trechos levantados é facilitada pela metodologia usada na medida da distância, que leva em conta os marcos presentes na rodovia.

Componentes do equipamento a laser utilizado nesta pesquisa

Componentes que acompanham o sistema do LMP/DET/UFC:

- Três módulos de medição a laser;
- Dois acelerômetros instalados dentro dos módulos laser;
- Sistema de medição de velocidade/deslocamento para ser instalado em rodas de veículo de passeio;
- Interface de comunicação entre o computador e o sistema;
- Suporte fixável (no lugar de engate) no veículo de passeio escolhido;
- Perfil especial de Alumínio, fixável no suporte veicular, onde são livremente posicionados os módulos laser ao longo de qualquer ponto da largura do veículo;
- Um Giroflex para sinalização do veículo;
- Cabos de ligação entre os componentes;
- Fonte para alimentação dos sensores, conectada na bateria do veículo;
- *Software Ciberlogger* para coleta dos dados (para Windows) e para a determinação dos perfis longitudinais dos pavimentos;
- *Software Cibershell* para o cálculo do IRI.

Dados técnicos do equipamento utilizado:

Número de módulos laser.....3 (L1, L2 e L5)

Número de acelerômetros.....2 (L1 e L5)

Tipo do hodômetro..... .....Ótico com 600 pulsos por volta

Curso dos medidores laser..... .....25 cm

Sensibilidade dos medidores laser.....0,2 mm

Distância do módulo em que o laser começa a medir.....20 cm

Taxa de aquisição de dados..... 2200 vezes/segundo

5.4.4 A operação de campo com o *Ciberlaser*

A descrição dos passos do procedimento de leitura no campo com o equipamento, baseia-se no Manual do Fabricante (CIBERMÉTRICA, 2005) e na vivência do autor da presente pesquisa durante os levantamentos efetuados. No anexo I são mostrados os procedimentos de campo, desde a instalação do equipamento no veículo, até os processamentos com os *softwares Ciberlogger e Cibershell*. A Figura 5.18 mostra a tela do *Ciberlogger* e as Figuras 5.19 e 5.20 mostram, a tela inicial e a geração de relatórios com os cálculos do IRI, do ATR e do perfil do *Cibershell*. A Tabela 5.15 mostra o cálculo da constante k, enquanto que as Tabelas 5.16 e 5.17 apresentam os cálculos do IRI e do ATR de um trecho desta pesquisa. Na tela do *software Ciberlogger* utilizado no nosso levantamento é possível visualizar os dados do QI. O *software Cibershell* é programado para transformar o QI em IRI.

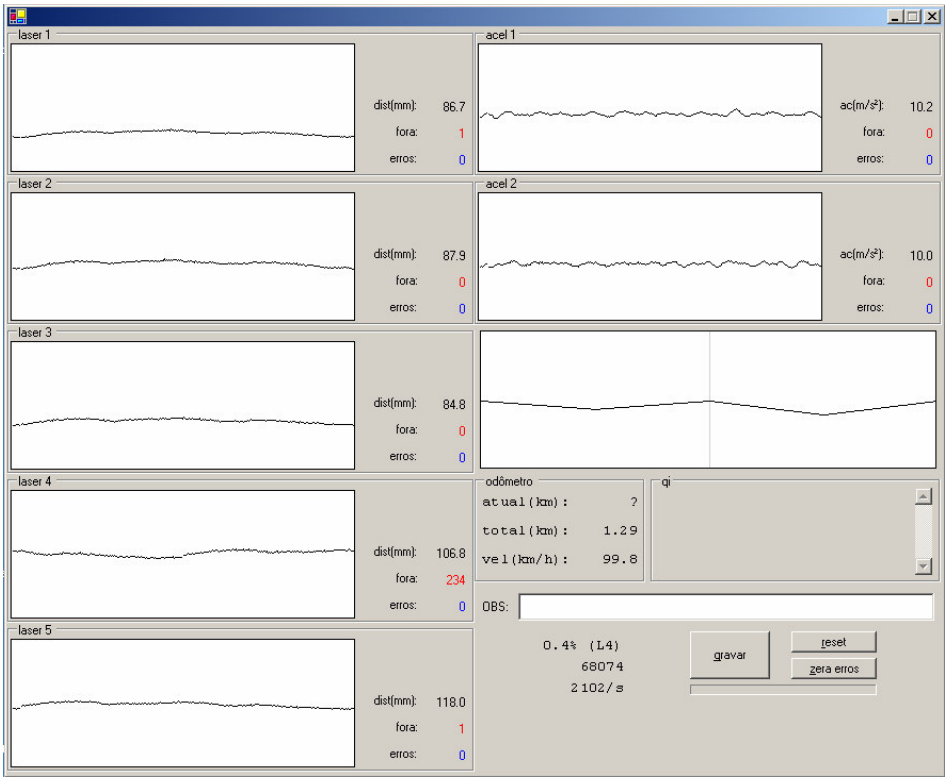


Figura 5.18 Tela do Software *Ciberlogger*

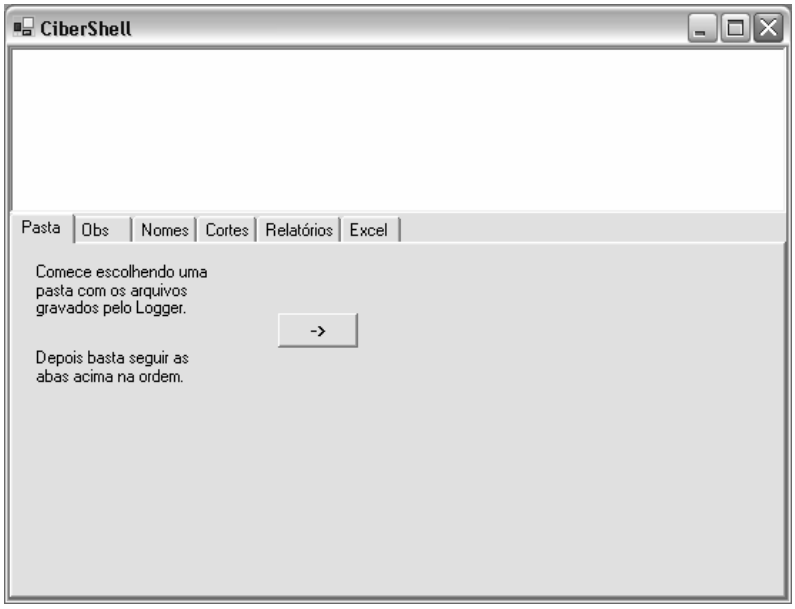


Figura 5.19 Tela inicial do *Cibershell*

Tabela 5.15 Exemplo de cálculo da constante K

Pulso inicial	1098432
Pulso Final	2950901
Distancia conhecida (km)	5,275
Constante K	2,8472E-06

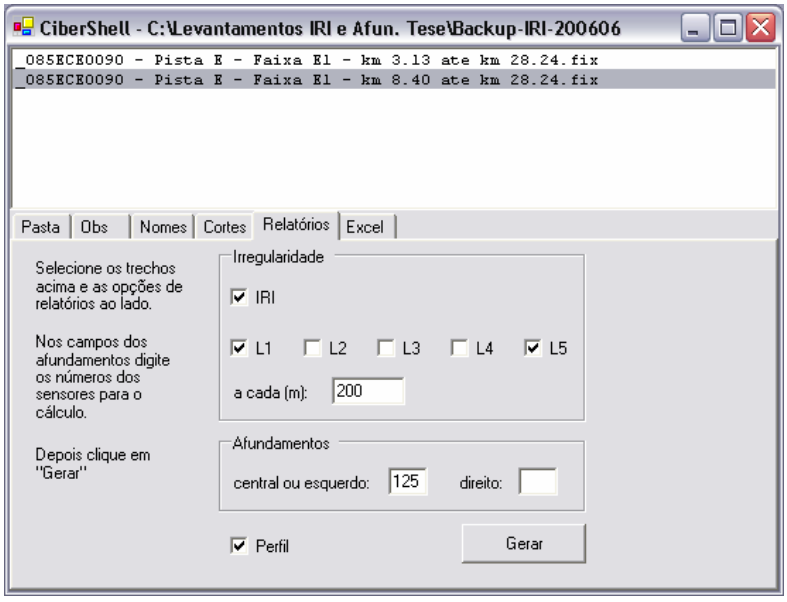


Figura 5.20 Geração de relatórios com os cálculos do IRI, afundamento e perfil

Tabela 5.16 Exemplo de cálculo do IRI de um trecho desta pesquisa

Realização:	TESE DO SÉRGIO
Data:	1/6/2006
Contratantes:	-
Equipamento:	Perfilômetro CiberLaser
Localização:	040ECE0030D
Sentido:	D
Faixa:	D2
Trecho:	km 6,94 até km 9,40
Posição dos Sensores:	Sobre as Trilhas de Roda
Distância entre Sensores:	140 cm

Trecho		**Valores do IRI**		
Início (km)	**Fim (km)**	**Trilha Interna**	**Trilha Externa**	**Média das Trilhas**
0,00	0,20	3,68	4,09	3,89
0,20	0,40	3,75	3,90	3,82
0,40	0,60	2,71	2,70	2,71
0,60	0,80	2,67	2,85	2,76
0,80	1,00	1,77	2,40	2,09
1,00	1,20	1,98	2,65	2,31
1,20	1,40	2,81	3,19	3,00
1,40	1,60	2,17	3,19	2,68
1,60	1,80	1,69	2,70	2,19
1,80	2,00	1,99	2,92	2,46
2,00	2,20	2,40	3,24	2,82
2,20	2,40	3,61	3,79	3,70
2,40	2,46	3,86	3,56	3,71
	IRI Médio			2,93

Tabela 5.17 Resultado do cálculo do afundamento de um trecho desta pesquisa

Realização:	TESE DO SÉRGIO
Data:	1/6/2006
Contratantes:	-
Equipamento:	Perfilômetro CiberLaser
Localização:	040ECE0030D
Sentido:	D
Faixa:	D2
Trecho:	km 6,94 até km 9,40
Distância entre Sensores (cm):	70 – 70 ou 140

Trecho		**Afundamento (mm)**		
Início (km)	**Fim (km)**	**Média dos ATRs Esq e Dir**	**Desvio**	**Número de medidas (N)**
0,00	0,01	4,7	2,8	991
0,01	0,02	10,1	1,7	1012
0,02	0,03	3,3	0,8	1050
0,03	0,04	-	-	-
0,04	0,05	2,0	1,4	1054
0,05	0,06	10,0	0,4	1030
0,06	0,07	9,9	0,6	997
0,07	0,08	7,4	0,3	988
0,08	0,09	7,9	0,5	993
0,09	0,10	10,6	0,5	982
0,10	0,11	9,7	0,4	980
0,11	0,12	11,0	0,6	967
0,12	0,13	8,3	0,4	965
0,13	0,14	6,4	0,4	966
0,14	0,15	4,2	0,5	975
0,15	0,16	2,4	0,7	978
0,16	0,17	4,1	0,4	1036
0,17	0,18	4,2	0,6	1109
0,18	0,19	4,0	0,6	1167
0,19	0,20	3,2	0,5	1186
0,20	0,21	2,6	0,5	1192
0,21	0,22	3,7	0,4	1179
0,22	0,23	4,9	0,5	1244
0,23	0,24	3,6	0,9	1253
0,24	0,25	9,6	0,8	1263
0,25	0,26	9,0	1,0	1296
0,26	0,27	13,0	0,6	1277
0,27	0,28	9,4	0,6	1267
0,28	0,29	6,3	0,5	1286
0,29	0,30	7,4	0,8	1300
0,30	0,31	9,3	0,7	1301
0,31	0,32	11,0	0,8	1367
0,32	0,33	12,3	0,8	1387
0,33	0,34	7,2	0,4	1376
0,34	0,35	8,0	0,7	1344
0,35	0,36	7,0	0,7	1353

5.4.5 Procedimento para o cálculo do IRI

O procedimento utilizado para o cálculo do IRI, a partir do perfil longitudinal obtido com o perfilômetro a laser, tem como fundamentação a norma ASTM E 1364 – 95 (Revista em 2000).

O processamento para a determinação do IRI (SAYERS et al., 1986) é realizado pelo cálculo de quatro variáveis como funções relacionadas com o perfil analisado. Tais variáveis simulam o efeito do tráfego de um veículo padrão sobre o perfil em foco. As equações a seguir, 5.2, 5.3 e 5.4, são resolvidas para cada ponto, exceto para o primeiro. A inclinação média ao longo dos primeiros 11 m (0,5 segundos a 80 km/h) é usada para o cálculo das variáveis atribuindo os seguintes valores:

$$z_1' = z_3' = (Y_a - Y_1) / 11 \tag{5.2}$$

$$z_2' = z_4' = 0 \tag{5.3}$$

$$a = 11 / dx + 1 \tag{5.4}$$

onde :

Y_a representa o "a-ésimo" ponto levantado do perfil, Y_1 o primeiro ponto, e dx é o intervalo da amostra. Assim, para um intervalo dx = 0,25m, a equação 5.2 usaria a diferença entre o 45º (quadragésimo quinto) ponto do perfil e o primeiro ponto até estabelecer uma inclinação inicial para o cálculo do IRI. As quatro seguintes equações, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8, são então resolvidas para cada ponto do perfil, de 2 a n (sendo n = número de pontos levantados).

$$z_1 = z_{11} \times z_1' + z_{12} \times z_2' + z_{13} \times z_3' + z_{14} \times z_4' + P_1 \times Y' \tag{5.5}$$

$$z_2 = z_{21} \times z_1' + z_{22} \times z_2' + z_{23} \times z_3' + z_{24} \times z_4' + P_2 \times Y' \tag{5.6}$$

$$z_3 = z_{31} \times z_1' + z_{32} \times z_2' + z_{33} \times z_3' + z_{34} \times z_4' + P_3 \times Y' \tag{5.7}$$

$$z_4 = z_{41} \times z_1' + z_{42} \times z_2' + z_{43} \times z_3' + z_{44} \times z_4' + P_4 \times Y' \tag{5.8}$$

onde,

$$Y' = (Y_i - Y_{i-1}) / dx = \text{inclinação de entrada;} \tag{5.9}$$

$$z_j' = z_j \text{ da posição anterior, } j = 1,4; \tag{5.10}$$

s_{ij} and p_j são coeficientes fixados para um dado intervalo da amostra, dx. Assim, as equações 5.5 a 5.8 são resolvidas para cada posição ao longo da trilha da roda. A

equação 5.10 é usada para ajustar os valores de Z_1', Z_2', Z_3', e Z_4' para a posição subseqüente. Também para cada posição, a inclinação corrigida (RS) do perfil analisado é computada como mostrado na equação 5.11:

$$RS_i = \left| Z_3 - Z_1 \right| \tag{5.11}$$

O IRI estatístico é a média da variável de RS sobre o comprimento do local. Assim depois que as equações acima foram resolvidas para todos os pontos do perfil, o IRI é calculado pela equação 5.12, da seguinte forma:

$$IRI = [1/(n-1)] \times \sum_{i=2}^{n} RS_i \tag{5.12}$$

O procedimento descrito é válido para todo o intervalo da amostra entre dx = 0,25 m e dx = 0,61m (2,0ft). Para intervalos mais curtos da amostra, a etapa adicional da análise consiste em compensar o perfil com um valor médio que represente da melhor maneira a vibração que o pneu de um veículo absorve do pavimento. O comprimento básico para o calculo da média é 0,25 m ao longo do trecho. O IRI pode então ser calculado através de qualquer uma das duas maneiras a seguir:

- Os pontos da elevação que se localizam dentro de cada dx do comprimento permitem o cálculo do valor médio para a obtenção de um ponto equivalente do perfil. O IRI é então calculado a partir das equações acima, baseadas em um intervalo de 0,25m, usando os coeficientes para o mesmo intervalo.
- "Uma média dinâmica" é obtida como a média de todos os pontos que se situam no ponto central de cada intervalo de 0,25 m do perfil. O IRI é calculado por meio da resolução das equações para cada ponto calculado da média usando coeficientes nas equações apropriadas para o menor intervalo.

Perfis e coeficientes utilizados neste estudo para as equações do IRI

No Brasil é corrente o uso da avaliação da irregularidade pelo QI, e neste caso o programa de cálculo de conversão baseia-se em um intervalo de 0,50 m e não 0,25 m como descrito na norma ASTM E 1364 – 95 (Revista em 2000). Assim, nesta pesquisa, o perfil utilizado, para fazer uma aproximação com a calibração utilizada no Brasil, tem espaçamento (dx) de 0,50 m, como nos levantamentos em nível e mira. Foram utilizados os coeficientes para o algoritmo de cálculo, mostrada na Tabela 5.18, e as equações

desenvolvidas por SAYERS et al. (1986). Mas, o princípio é o mesmo descrito anteriormente.

Tabela 5.18. Coeficientes usados no algoritmo para o cálculo do IRI (SAYERS et al., 1986)

Algoritmo para dx = 0,50 m e a = 22				
0,9881727	2,13E-02	-2,52E-02	9,92E-04	3,70E-02
-0,928516	0,9001616	-3,391369	6,28E-02	4,319885
6,39E-02	6,62E-03	0,2402896	9,86E-03	0,6958473
3,743294	0,4186779	-46,67883	-0,1145251	42,93555

No anexo II, apresentamos um exemplo do cálculo de um valor de IRI de parte de um dos trechos da pesquisa com 50,0 m para dx = 0,50 m e a = 22. Todos os outros cálculos dos valores do IRI foram efetuados em planilhas eletrônicas.

O afundamento de trilha de roda (ATR) é calculado pela equação 5.13, com leituras correspondentes aos respectivos sensores. Os resultados são mostrados a cada 10 m, como na Tabela 5.17:

$$ATR = L_2 - \left(\frac{L_1 + L_5}{2} \right) \qquad (5.13)$$

5.4.6 Levantamentos efetuados com o perfilômetro a laser nesta pesquisa

Antes de serem efetuados os levantamentos desta pesquisa, o aparelho *Ciberlaser* da UFC foi utilizado em rodovias de Curitiba-PR, em bases ou segmentos de IRI conhecidos e determinados com outros instrumentos. Este trabalho possibilitou uma checagem do equipamento a laser, sendo verificada com sucesso a repetibilidade e a precisão dos resultados. As Tabelas 5.19, 5.20 e 5.21, mostram os resultados de medições efetuadas nestas bases em datas diferentes. A Tabela 5.22 apresenta o resumo dos resultados de três bases ou segmentos de calibração, efetuada com nível e mira e com o *Ciberlaser*, verificando-se uma diferença máxima de 7% entre as medidas de irregularidade nos dois processos. A Tabela 5.22 mostra ainda a evolução da irregularidade nestes três segmentos entre 2005 e 2006.

Tabela 5.19 Leituras de Irregularidade em bases de calibração no PR, efetuadas em 28/03/2006 com o equipamento a laser da UFC

Local	Trilha Esquerda	Trilha Direita	Média
Base 5r-1	1,54	1,59	1,57
Base 5r-2	1,54	1,61	1,58
Base 5r-3	1,50	1,66	1,58
Base 5r-4	1,52	1,63	1,58
Base 5r-5	1,53	1,60	1,57
Base 5r-6	1,49	1,68	1,59
Base 5r-7	1,49	1,60	1,55
Base 5r-8	1,54	1,69	1,62
Base 5r-9	1,48	1,61	1,55
Base 5r-10	1,47	1,63	1,55
Média	**1,51**	**1,63**	**1,57**

Tabela 5.20 Leituras de Irregularidade em bases de calibração no PR, efetuadas em 14/04/2006 com o equipamento a laser da UFC

Local	Trilha Esquerda	Trilha Direita	Média
Base 5r-1	1,57	1,71	1,64
Base 5r-2	1,55	1,64	1,60
Base 5r-3	1,52	1,69	1,61
Base 5r-4	1,54	1,62	1,58
Base 5r-5	1,47	1,63	1,55
Média	**1,53**	**1,66**	**1,59**

Tabela 5.21 Leituras de Irregularidade em bases de calibração no PR, efetuadas em 27/04/2006 com o equipamento a laser da UFC

Local	Trilha Esquerda	Trilha Direita	Média
Base 5r-1	1,50	1,68	1,59
Base 5r-2	1,56	1,67	1,62
Base 5r-3	1,54	1,68	1,61
Base 5r-4	1,50	1,59	1,55
Base 5r-5	1,58	1,65	1,62
Base 5r-6	1,56	1,57	1,57
Base 5r-7	1,49	1,61	1,55
Base 5r-8	1,51	1,60	1,56
Base 5r-9	1,48	1,63	1,56
Base 5r-10	1,57	1,59	1,58
Média	**1,53**	**1,63**	**1,58**

Tabela 5.22 Resumo dos resultados obtidos nas bases de calibração do PR com nível e mira e com o *Ciberlaser* da UFC para irregularidade

BASE	Nível e mira QI 2006			Nível e mira IRI 2006			Laser 2006			DIF,	IRI 2005
	TRI	TRE	MÉDIA	TRI	TRE	MÉDIA	TRI	TRE	MÉDIA		
3	46,69	87,01	66,85	3,59	6,69	5,14	3,88	5,64	4,76	7%	4,37
5R	26,22	17,82	22,02	2,02	1,37	1,69	1,51	1,63	1,57	7%	1,66
6	56,28	88,67	72,47	4,33	6,82	5,57	3,99	6,81	5,40	3%	5,06

Os levantamentos com o *Ciberlaser*, desta pesquisa de tese, para a obtenção de dados que permitam a geração de modelos de desempenhos de pavimentos em função do IRI, foram efetuados nos trechos escolhidos da RMF, em junho de 2006, em três etapas:

- A primeira, nos 72 trechos selecionados na RMF, com um total de 493,94 Km, com o equipamento com os sensores dispostos na traseira do veículo na posição normal, conforme Figura 5.16, com a distância entre os sensores extremos variando entre 140 e 142 cm.
- A segunda e a terceira em 42 trechos selecionados dos 72 iniciais, com um total de 667,46 km, com os sensores dispostos na traseira do veículo no lado direito (LD), Figura 5.21 e lado esquerdo (LE), Figura 5.22, com a distância entre os sensores extremos igual a 24 cm.

Figura 5.21 Disposição dos sensores fixados na traseira do veículo, no LD

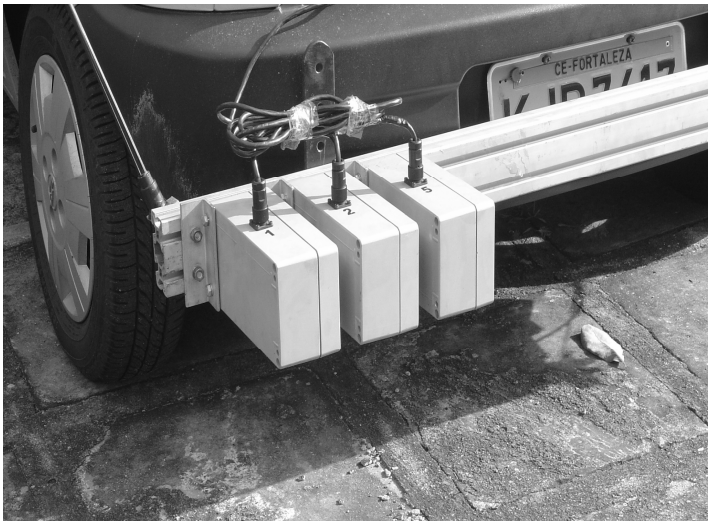


Figura 5.22 Disposição dos sensores fixados na traseira do veículo, no LE

Alguns comentários e conclusões pertinentes, observados durante os levantamentos, decorrentes da sensibilidade do equipamento:

- Deve ser feita, com certa freqüência, a verificação de sujeira no visor do laser.
- A luz solar causa reflexos nos sensores, Deve ser evitado o levantamento entre 11:00 h e 14:00 h, principalmente nos trechos em TSD.
- Evitar fazer levantamento com o pavimento molhado.

Os levantamentos de campo utilizando o perfilômetro a laser, para a determinação dos valores do IRI nos trechos desta pesquisa, foram efetuados em 1.161,400 km de rodovias, em três etapas. Para a compilação dos dados foram gerados 207 arquivos em nove pastas num total de 10,6 GB. Alguns desses arquivos, por exemplo, os do tipo "log" chegam a ter 300 MB de tamanho, tornando a manipulação desses dados uma tarefa que exige uma organização eficiente e que requer muitos cuidados.

Resultados do IRI e do ATR dos levantamentos

Nas Tabelas 5.23 a 5.29 com os resultados do IRI e do ATR para as três etapas dos levantamentos a seguir apresentadas, IRI_I representa o resultado do sensor na trilha interna da faixa da pista, IRI_E o resultado do sensor na trilha externa da faixa da pista e $\mathbf{IRI_{médio}}$ a média dos dois resultados anteriores. Também é mostrado o desvio padrão (σ) entre as médias do IRI_{int} e IRI_{ext} e do ATR de cada trecho. Estes resultados serão

empregados no próximo capítulo para obtenção dos modelos de desempenho e correlações com outros levantamentos.

As Tabelas 5.23 e 5.24 apresentam os resultados do IRI, do ATR e dos respectivos desvios dos levantamentos efetuados na primeira etapa, ou seja, dos 72 trechos, com os sensores dispostos na posição normal.

Tabela 5.23 Resultados - trilha interna, trilha externa, média e desvio padrão - do IRI dos 72 trechos da RMF, sensores na posição normal (Julho, 2006)

Trecho	Extensão (m)	Tipo de revestimento	IRI_{int}	IRI_{ext}	$IRI_{médio}$	Desvio Padrão (σ)
01-025ECE0010D	6.335	CBUQ	3,66	3,53	3,60	0,09
02-025ECE0010E	6.335	CBUQ	3,11	3,74	3,42	0,44
03-025ECE0030D	6.988	AAUQ	4,50	4,54	4,52	0,03
04-025ECE0030E	6.988	AAUQ	4,37	4,22	4,30	0,11
05-025ECE0050D	5.072	AAUQ	2,52	3,10	2,81	0,41
06-025ECE0050E	5.072	AAUQ	2,54	2,73	2,63	0,14
07-040ECE0010D	6.940	CBUQ	3,19	3,46	3,33	0,19
08-040ECE0010E	6.907	CBUQ	2,83	3,03	2,93	0,14
09-040ECE0030D	2.460	CBUQ	2,70	3,17	2,93	0,33
10-040ECE0030E	2.451	CBUQ	2,37	2,86	2,62	0,35
11-040ECE0050D	4.294	CBUQ	1,99	2,56	2,28	0,40
12-040ECE0050E	4.335	CBUQ	2,03	2,47	2,25	0,32
13-040ECE0070D	5.310	CBUQ	1,79	2,16	1,98	0,26
14-040ECE0070E	5.302	CBUQ	1,77	2,08	1,93	0,22
15-040ECE0090D	3.869	CBUQ	2,19	2,81	2,50	0,44
16-040ECE0090E	3.907	CBUQ	2,08	2,30	2,19	0,15
17-040ECE0110D	2.533	CBUQ	2,41	3,00	2,71	0,42
18-040ECE0110E	2.511	CBUQ	2,71	2,80	2,75	0,07
19-040ECE0130D	6.488	CBUQ	2,09	2,42	2,26	0,23
20-040ECE0130E	6.488	CBUQ	2,34	2,20	2,27	0,10
21-040ECE0150D	9.131	CBUQ	2,30	2,51	2,41	0,15
22-040ECE0150E	9.131	CBUQ	2,24	2,28	2,26	0,02
23-040ECE0170D	9.940	CBUQ	2,46	2,35	2,41	0,08
24-040ECE0170E	9.940	CBUQ	2,40	2,15	2,27	0,18
25-060ECE0010D	3.838	CBUQ	3,40	3,63	3,51	0,17
26-060ECE0010E	3.829	CBUQ	3,09	3,01	3,05	0,06
27-060ECE0030D	3.806	CBUQ	3,99	3,59	3,79	0,29
28-060ECE0030E	3.778	CBUQ	2,91	3,08	2,99	0,12
29-060ECE0050D	5.809	CBUQ	3,17	3,02	3,10	0,10
30-060ECE0050E	5.819	CBUQ	3,02	2,89	2,96	0,09
31-060ECE0070D	6.257	CBUQ	2,89	2,89	2,89	0,00
32-060ECE0070E	6.204	CBUQ	2,62	2,65	2,63	0,02
33-060ECE0090D	1.950	CBUQ	3,09	3,31	3,20	0,16
34-060ECE0090E	1.974	CBUQ	2,92	3,08	3,00	0,11
35-060ECE0110D	5.267	CBUQ	2,97	2,89	2,93	0,06
36-060ECE0110E	5.267	CBUQ	2,92	3,23	3,08	0,21
37-060ECE0130D	15.865	CBUQ	2,57	2,17	2,37	0,28
38-060ECE0130E	15.865	CBUQ	2,64	2,58	2,61	0,04
39-060ECE0150D	6.921	CBUQ	2,78	2,60	2,69	0,13
40-060ECE0150E	6.921	CBUQ	2,98	3,07	3,03	0,07
41-065ECE0010D	316	CBUQ	5,77	6,36	6,07	0,42
42-065ECE0010E	316	CBUQ	6,72	8,63	7,67	1,35
43-065ECE0030D	3.564	CBUQ	2,33	2,67	2,50	0,24
44-065ECE0030E	3.597	CBUQ	2,03	2,30	2,17	0,20

Tabela 5.23 Resultados - trilha interna, trilha externa, média e desvio padrão - do IRI dos 72 trechos da RMF, sensores na posição normal (Julho, 2006)

Trecho	Extensão (m)	Tipo de revestimento	IRI_{int}	IRI_{ext}	$IRI_{médio}$	Desvio Padrão (σ)
45-065ECE0050D	6.835	CBUQ	2,19	2,25	2,22	0,04
46-065ECE0050E	6.861	CBUQ	2,07	2,20	2,13	0,09
47-085ECE0030D	1.483	TSD	4,59	4,92	4,76	0,23
48-085ECE0030E	1.483	TSD	5,66	5,57	5,61	0,07
49-085ECE0050D	1.956	TSD	3,67	3,64	3,65	0,01
50-085ECE0050E	1.956	TSD	3,97	4,41	4,19	0,31
51-085ECE0070D	14.728	TSD	3,31	3,57	3,44	0,18
52-085ECE0070E	14.728	TSD	3,36	3,80	3,58	0,31
53-085ECE0090D	8.337	TSD	3,16	3,46	3,31	0,22
54-085ECE0090E	8.337	TSD	3,32	3,88	3,60	0,40
55-085ECE0110D	4.392	TSD	3,21	3,39	3,30	0,13
56-085ECE0110E	4.392	TSD	3,39	3,56	3,47	0,12
57-085ECE0130D	6.628	TSD	3,12	3,21	3,17	0,06
58-085ECE0130E	6.628	TSD	2,92	3,48	3,20	0,40
59-085ECE0150D	8.658	TSD	3,04	3,29	3,17	0,18
60-085ECE0150E	8.658	TSD	3,31	4,44	3,88	0,80
61-085ECE0170D	14.291	TSD	2,98	3,07	3,03	0,06
62-085ECE0170E	14.291	TSD	3,12	3,26	3,19	0,10
63-090ECE0010D	7.244	TSD	4,32	4,61	4,46	0,20
64-090ECE0010E	7.244	TSD	4,32	4,61	4,46	0,20
65-341ECE0010D	11.561	AAUQ	3,15	3,12	3,14	0,02
66-341ECE0010E	11.561	AAUQ	2,87	2,94	2,91	0,04
67-341ECE0030D	4.434	AAUQ	2,25	2,11	2,18	0,10
68-341ECE0030E	4.434	AAUQ	2,34	2,35	2,35	0,00
69-341ECE0050D	12.565	AAUQ	2,28	2,03	2,16	0,18
70-341ECE0050E	12.565	AAUQ	2,26	2,22	2,24	0,03
71-341ECE0070D	20.903	TSD	2,55	2,45	2,50	0,07
72-341ECE0070E	20.903	TSD	2,69	2,39	2,54	0,21

Na análise dos resultados dos 72 trechos deste estudo, percebe-se que as variações maiores nas medições do IRI são decorrentes de pontos isolados. Verifica-se que de modo geral, os trechos apresentam desvio padrão baixo. Porém, o trecho 42-065ECE0010E com 316 m, apresentou um alto desvio padrão por estar com uma condição funcional do pavimento péssima, principalmente na faixa externa. A consideração deste trecho, com valores de IRI e de desvio padrão considerados extremos da amostra em relação aos resultados dos demais trechos, deverá ter influência quando dos estudos para determinação dos modelos de desempenho. Também é baixo o desvio padrão dos afundamentos de trilha de roda (ATR) destes trechos, medidos com o perfilômetro a laser, como se pode perceber nos resultados da Tabela 5.24.

Tabela 5.24 Resultados do ATR dos 72 trechos da RMF, com os sensores na posição normal (Julho, 2006)

Trecho	Extensão (m)	Tipo de revestimento	Média dos ATRs Esq e Dir (mm)	Desvio Padrão (σ)
01-025ECE0010D	6.335	CBUQ	8,8	1,0
02-025ECE0010E	6.335	CBUQ	7,0	0,9
03-025ECE0030D	6.988	AAUQ	6,7	0,9
04-025ECE0030E	6.988	AAUQ	7,2	0,8
05-025ECE0050D	5.072	AAUQ	5,3	0,4
06-025ECE0050E	5.072	AAUQ	5,4	0,4
07-040ECE0010D	6.940	CBUQ	5,9	0,8
08-040ECE0010E	6.907	CBUQ	3,4	0,6
09-040ECE0030D	2.460	CBUQ	6,4	0,6
10-040ECE0030E	2.451	CBUQ	6,5	0,6
11-040ECE0050D	4.294	CBUQ	6,5	0,6
12-040ECE0050E	4.335	CBUQ	6,9	0,5
13-040ECE0070D	5.310	CBUQ	6,8	0,4
14-040ECE0070E	5.302	CBUQ	6,6	0,4
15-040ECE0090D	3.869	CBUQ	5,8	0,6
16-040ECE0090E	3.907	CBUQ	6,3	0,4
17-040ECE0110D	2.533	CBUQ	4,6	0,6
18-040ECE0110E	2.511	CBUQ	7,6	0,5
19-040ECE0130D	6.488	CBUQ	5,9	0,5
20-040ECE0130E	6.488	CBUQ	4,9	0,5
21-040ECE0150D	9.131	CBUQ	9,4	0,4
22-040ECE0150E	9.131	CBUQ	9,3	0,4
23-040ECE0170D	9.940	CBUQ	7,6	0,5
24-040ECE0170E	9.940	CBUQ	7,7	0,4
25-060ECE0010D	3.838	CBUQ	4,8	0,8
26-060ECE0010E	3.829	CBUQ	3,7	0,6
27-060ECE0030D	3.806	CBUQ	3,4	0,9
28-060ECE0030E	3.778	CBUQ	3,9	0,8
29-060ECE0050D	5.809	CBUQ	7,4	0,6
30-060ECE0050E	5.819	CBUQ	5,3	0,6
31-060ECE0070D	6.257	CBUQ	3,7	0,6
32-060ECE0070E	6.204	CBUQ	4,4	0,7
33-060ECE0090D	1.950	CBUQ	6,0	0,7
34-060ECE0090E	1.974	CBUQ	8,0	0,7
35-060ECE0110D	5.267	CBUQ	4,9	0,5
36-060ECE0110E	5.267	CBUQ	5,4	0,6
37-060ECE0130D	15.865	CBUQ	4,7	0,5
38-060ECE0130E	15.865	CBUQ	5,5	0,5
39-060ECE0150D	6.921	CBUQ	5,3	0,5
40-060ECE0150E	6.921	CBUQ	6,2	0,6
41-065ECE0010D	316	CBUQ	4,1	0,9
42-065ECE0010E	316	CBUQ	2,8	0,9
43-065ECE0030D	3.564	CBUQ	2,6	0,6
44-065ECE0030E	3.597	CBUQ	2,9	0,6
45-065ECE0050D	6.835	CBUQ	3,6	0,6
46-065ECE0050E	6.861	CBUQ	5,0	0,4
47-085ECE0030D	1.483	TSD	5,5	1,2
48-085ECE0030E	1.483	TSD	6,0	1,4
49-085ECE0050D	1.956	TSD	7,2	0,9
50-085ECE0050E	1.956	TSD	7,5	0,9
51-085ECE0070D	14.728	TSD	5,8	0,8

Tabela 5.24 Resultados do ATR dos 72 trechos da RMF, com os sensores na posição normal (Julho, 2006)

Trecho	Extensão (m)	Tipo de revestimento	Média dos ATRs Esq e Dir (mm)	Desvio Padrão (σ)
52-085ECE0070E	14.728	TSD	6,0	0,8
53-085ECE0090D	8.337	TSD	5,8	0,9
54-085ECE0090E	8.337	TSD	5,1	1,2
55-085ECE0110D	4.392	TSD	5,7	1,1
56-085ECE0110E	4.392	TSD	7,5	0,9
57-085ECE0130D	6.628	TSD	6,0	0,9
58-085ECE0130E	6.628	TSD	6,9	1,3
59-085ECE0150D	8.658	TSD	6,9	0,9
60-085ECE0150E	8.658	TSD	8,0	1,7
61-085ECE0170D	14.291	TSD	7,2	1,0
62-085ECE0170E	14.291	TSD	6,7	0,9
63-090ECE0010D	7.244	TSD	6,0	1,1
64-090ECE0010E	7.244	TSD	6,1	1,0
65-341ECE0010D	11.561	AAUQ	9,7	0,6
66-341ECE0010E	11.561	AAUQ	7,2	0,6
67-341ECE0030D	4.434	AAUQ	7,2	0,4
68-341ECE0030E	4.434	AAUQ	4,6	0,5
69-341ECE0050D	12.565	AAUQ	6,8	0,4
70-341ECE0050E	12.565	AAUQ	4,4	0,4
71-341ECE0070D	20.903	TSD	3,5	0,6
72-341ECE0070E	20.903	TSD	3,7	0,7

Nos levantamentos da segunda e terceira etapas, foram escolhidos dentre os 72 trechos iniciais, 42 (quarenta e dois), com uma extensão total de 333,73 km, representando 67,56% dos 493,94 km dos 72 trechos iniciais. Uma amostra bastante representativa. A motivação principal deste estudo foi a de verificar se há influência do tamanho da barra (haste) utilizada (1,40 m) e a posição relativa dos sensores em relação às trilhas de roda, nos resultados do IRI da trilha interna.

Os sensores nestas etapas foram colocados no LD na segunda e no LE na terceira. A distância interna entre eles foi de 12 cm, ou 24 cm entre os extremos. Neste caso, devido à disposição dos sensores, o relatório fornece três resultados do IRI, sendo além do IRI_I e do IRI_E, o IRI central, IRI_c, que corresponde ao sensor do meio, no caso o L2. Quando da geração do relatório, Figura 5.20, deve ser acionado também o L2. O cálculo do IRI é feito na própria planilha de resultados do Excel *a posteriori*.

Os resultados do IRI e do ATR dos 42 trechos da RMF, destas etapas, são mostrados nas Tabelas 5.25 e 5.26, para os três sensores colocados no LD e nas Tabelas 5.27 e 5.28 com os sensores do LE.

Tabela 5.25 Resultados do IRI com os três sensores colocados no LD nos 42 trechos da RMF (Julho, 2006)

Trecho	Extensão (m)	Tipo de revestimento	IRI_{int}	IRI_C	IRI_{ext}	$IRI_{MÉDIO}$
25-060ECE0010D	3.838	CBUQ	3,52	3,57	3,65	3,58
26-060ECE0010E	3.829	CBUQ	2,75	2,79	2,83	2,79
27-060ECE0030D	3.806	CBUQ	3,43	3,60	3,82	3,62
28-060ECE0030E	3.778	CBUQ	2,89	3,08	3,21	3,06
29-060ECE0050D	5.809	CBUQ	2,87	2,92	2,98	2,93
30-060ECE0050E	5.819	CBUQ	2,84	2,89	2,95	2,89
31-060ECE0070D	6.257	CBUQ	2,86	2,86	2,87	2,86
32-060ECE0070E	6.204	CBUQ	2,68	2,71	2,74	2,71
33-060ECE0090D	1.950	CBUQ	3,02	3,10	3,22	3,11
34-060ECE0090E	1.974	CBUQ	3,18	3,22	3,27	3,22
35-060ECE0110D	5.267	CBUQ	2,64	2,78	2,93	2,78
36-060ECE0110E	5.267	CBUQ	3,10	3,24	3,38	3,24
37-060ECE0130D	15.865	CBUQ	2,09	2,15	2,25	2,16
38-060ECE0130E	15.865	CBUQ	2,43	2,56	2,67	2,55
39-060ECE0150D	6.921	CBUQ	2,44	2,59	2,70	2,58
40-060ECE0150E	6.921	CBUQ	2,78	2,97	3,19	2,98
47-085ECE0030D	1.483	TSD	4,92	5,22	5,33	5,16
48-085ECE0030E	1.483	TSD	5,40	5,81	5,95	5,72
49-085ECE0050D	1.956	TSD	3,59	3,65	3,78	3,67
50-085ECE0050E	1.956	TSD	4,89	5,02	5,23	5,05
51-085ECE0070D	14.728	TSD	3,45	3,56	3,67	3,56
52-085ECE0070E	14.728	TSD	3,66	3,75	3,83	3,75
53-085ECE0090D	8.337	TSD	3,39	3,41	3,52	3,44
54-085ECE0090E	8.337	TSD	3,36	3,41	3,49	3,42
55-085ECE0110D	4.392	TSD	3,60	3,63	3,66	3,63
56-085ECE0110E	4.392	TSD	3,42	3,43	3,50	3,45
57-085ECE0130D	6.628	TSD	3,48	3,40	3,38	3,42
58-085ECE0130E	6.628	TSD	3,32	3,32	3,32	3,32
59-085ECE0150D	8.658	TSD	3,40	3,40	3,50	3,43
60-085ECE0150E	8.658	TSD	3,69	3,74	3,84	3,76
61-085ECE0170D	14.291	TSD	3,02	3,02	3,08	3,04
62-085ECE0170E	14.291	TSD	3,13	3,18	3,22	3,17
63-090ECE0010D	7.244	TSD	4,59	4,87	5,08	4,85
64-090ECE0010E	7.244	TSD	3,78	3,87	3,97	3,87
65-341ECE0010D	11.561	AAUQ	2,97	3,02	3,10	3,03
66-341ECE0010E	11.561	AAUQ	2,86	2,94	3,01	2,94
67-341ECE0030D	4.434	AAUQ	2,05	2,15	2,25	2,15
68-341ECE0030E	4.434	AAUQ	2,20	2,24	2,29	2,25
69-341ECE0050D	12.565	AAUQ	1,93	2,00	2,08	2,00
70-341ECE0050E	12.565	AAUQ	2,06	2,13	2,23	2,14
71-341ECE0070D	20.903	TSD	2,43	2,46	2,56	2,48
72-341ECE0070E	20.903	TSD	2,32	2,33	2,39	2,35

Tabela 5.26 Resultados do ATR com os três sensores colocados no LD nos 42 trechos da RMF (Julho, 2006)

Trecho	Extensão (m)	Tipo de revestimento	Média dos ATRs Esq e Dir	Desvio Padrão (σ)
25-060ECE0010D	3.838	CBUQ	1,0	0,3
26-060ECE0010E	3.829	CBUQ	0,9	0,3
27-060ECE0030D	3.806	CBUQ	0,8	0,4
28-060ECE0030E	3.778	CBUQ	0,8	0,5
29-060ECE0050D	5.809	CBUQ	1,0	0,2
30-060ECE0050E	5.819	CBUQ	0,9	0,2
31-060ECE0070D	6.257	CBUQ	0,9	0,2
32-060ECE0070E	6.204	CBUQ	0,8	0,2
33-060ECE0090D	1.950	CBUQ	0,9	0,2
34-060ECE0090E	1.974	CBUQ	0,7	0,2
35-060ECE0110D	5.267	CBUQ	1,0	0,2
36-060ECE0110E	5.267	CBUQ	0,9	0,2
37-060ECE0130D	15.865	CBUQ	0,9	0,2
38-060ECE0130E	15.865	CBUQ	0,9	0,2
39-060ECE0150D	6.921	CBUQ	0,9	0,3
40-060ECE0150E	6.921	CBUQ	1,0	0,3
47-085ECE0030D	1.483	TSD	0,5	0,3
48-085ECE0030E	1.483	TSD	0,8	0,3
49-085ECE0050D	1.956	TSD	0,6	0,5
50-085ECE0050E	1.956	TSD	0,7	0,4
51-085ECE0070D	14.728	TSD	0,8	0,4
52-085ECE0070E	14.728	TSD	0,9	0,4
53-085ECE0090D	8.337	TSD	0,8	0,5
54-085ECE0090E	8.337	TSD	0,9	0,5
55-085ECE0110D	4.392	TSD	0,7	0,5
56-085ECE0110E	4.392	TSD	0,8	0,5
57-085ECE0130D	6.628	TSD	0,7	0,5
58-085ECE0130E	6.628	TSD	0,8	0,5
59-085ECE0150D	8.658	TSD	0,7	0,5
60-085ECE0150E	8.658	TSD	0,7	0,5
61-085ECE0170D	14.291	TSD	0,6	0,4
62-085ECE0170E	14.291	TSD	0,8	0,5
63-090ECE0010D	7.244	TSD	0,8	0,6
64-090ECE0010E	7.244	TSD	0,7	0,5
65-341ECE0010D	11.561	AAUQ	0,7	0,2
66-341ECE0010E	11.561	AAUQ	0,7	0,2
67-341ECE0030D	4.434	AAUQ	0,7	0,2
68-341ECE0030E	4.434	AAUQ	1,0	0,2
69-341ECE0050D	12.565	AAUQ	0,7	0,2
70-341ECE0050E	12.565	AAUQ	0,9	0,2
71-341ECE0070D	20.903	TSD	0,9	0,4
72-341ECE0070E	20.903	TSD	1,0	0,4

Tabela 5.27 Resultados do IRI com os três sensores colocados no LE nos 42 trechos da RMF (Julho, 2006)

Trecho	Extensão (m)	Tipo de revestimento	IRI_{ext}	IRI_C	IRI_{int}	$IRI_{MÉDIO}$
25-060ECE0010D	3.838	CBUQ	3,51	3,49	3,51	3,50
26-060ECE0010E	3.829	CBUQ	3,00	2,96	2,95	2,97
27-060ECE0030D	3.806	CBUQ	3,60	3,49	3,49	3,53
28-060ECE0030E	3.778	CBUQ	3,09	3,11	3,13	3,11
29-060ECE0050D	5.809	CBUQ	3,13	3,12	3,10	3,12
30-060ECE0050E	5.819	CBUQ	3,32	3,08	3,14	3,18
31-060ECE0070D	6.257	CBUQ	2,96	2,94	2,95	2,95
32-060ECE0070E	6.204	CBUQ	2,74	2,62	2,63	2,66
33-060ECE0090D	1.950	CBUQ	3,01	2,97	2,98	2,99
34-060ECE0090E	1.974	CBUQ	3,35	3,06	3,11	3,17
35-060ECE0110D	5.267	CBUQ	2,90	2,84	2,86	2,87
36-060ECE0110E	5.267	CBUQ	2,95	2,89	2,87	2,90
37-060ECE0130D	15.865	CBUQ	2,46	2,41	2,38	2,42
38-060ECE0130E	15.865	CBUQ	2,65	2,60	2,58	2,61
39-060ECE0150D	6.921	CBUQ	2,77	2,72	2,70	2,73
40-060ECE0150E	6.921	CBUQ	2,88	2,83	2,81	2,84
47-085ECE0030D	1.483	TSD	4,83	4,86	4,85	4,84
48-085ECE0030E	1.483	TSD	4,82	4,77	4,84	4,81
49-085ECE0050D	1.956	TSD	3,76	3,73	3,65	3,71
50-085ECE0050E	1.956	TSD	4,58	4,56	4,58	4,57
51-085ECE0070D	14.728	TSD	3,33	3,34	3,37	3,35
52-085ECE0070E	14.728	TSD	3,37	3,36	3,39	3,37
53-085ECE0090D	8.337	TSD	3,23	3,24	3,27	3,25
54-085ECE0090E	8.337	TSD	3,22	3,26	3,37	3,28
55-085ECE0110D	4.392	TSD	3,25	3,30	3,38	3,31
56-085ECE0110E	4.392	TSD	3,36	3,38	3,36	3,37
57-085ECE0130D	6.628	TSD	3,15	3,19	3,22	3,19
58-085ECE0130E	6.628	TSD	3,05	3,07	3,12	3,08
59-085ECE0150D	8.658	TSD	3,06	3,12	3,14	3,10
60-085ECE0150E	8.658	TSD	3,06	3,12	3,14	3,10
61-085ECE0170D	14.291	TSD	2,85	2,88	2,92	2,89
62-085ECE0170E	14.291	TSD	2,97	2,96	2,99	2,98
63-090ECE0010D	7.244	TSD	4,67	4,56	4,42	4,55
64-090ECE0010E	7.244	TSD	4,40	4,25	4,10	4,25
65-341ECE0010D	11.561	AAUQ	2,98	3,04	3,08	3,03
66-341ECE0010E	11.561	AAUQ	2,85	2,88	2,92	2,88
67-341ECE0030D	4.434	AAUQ	2,49	2,43	2,33	2,42
68-341ECE0030E	4.434	AAUQ	2,33	2,32	2,26	2,30
69-341ECE0050D	12.565	AAUQ	2,32	2,27	2,22	2,27
70-341ECE0050E	12.565	AAUQ	2,20	2,17	2,10	2,16
71-341ECE0070D	20.903	TSD	2,47	2,48	2,47	2,47
72-341ECE0070E	20.903	TSD	2,57	2,54	2,54	2,55

Tabela 5,28 Resultados do ATR com os três sensores colocados no LE nos 42 trechos da RMF (Julho, 2006)

Trecho	Extensão (m)	Tipo de revestimento	Média dos ATRs Esq e Dir	Desvio Padrão (σ)
25-060ECE0010D	3.838	CBUQ	1,4	0,3
26-060ECE0010E	3.829	CBUQ	1,4	0,2
27-060ECE0030D	3.806	CBUQ	1,3	0,5
28-060ECE0030E	3.778	CBUQ	0,8	0,5
29-060ECE0050D	5.809	CBUQ	1,3	0,2
30-060ECE0050E	5.819	CBUQ	0,4	0,3
31-060ECE0070D	6.257	CBUQ	1,3	0,2
32-060ECE0070E	6.204	CBUQ	0,7	0,3
33-060ECE0090D	1.950	CBUQ	1,2	0,2
34-060ECE0090E	1.974	CBUQ	0,6	0,4
35-060ECE0110D	5.267	CBUQ	1,5	0,2
36-060ECE0110E	5.267	CBUQ	1,3	0,3
37-060ECE0130D	15.865	CBUQ	1,4	0,2
38-060ECE0130E	15.865	CBUQ	1,4	0,3
39-060ECE0150D	6.921	CBUQ	1,3	0,3
40-060ECE0150E	6.921	CBUQ	1,4	0,3
47-085ECE0030D	1.483	TSD	1,5	0,5
48-085ECE0030E	1.483	TSD	1,2	0,5
49-085ECE0050D	1.956	TSD	1,4	0,4
50-085ECE0050E	1.956	TSD	1,4	0,4
51-085ECE0070D	14.728	TSD	1,4	0,4
52-085ECE0070E	14.728	TSD	1,3	0,4
53-085ECE0090D	8.337	TSD	1,4	0,4
54-085ECE0090E	8.337	TSD	1,3	0,5
55-085ECE0110D	4.392	TSD	1,3	0,5
56-085ECE0110E	4.392	TSD	1,4	0,5
57-085ECE0130D	6.628	TSD	1,4	0,5
58-085ECE0130E	6.628	TSD	1,4	0,5
59-085ECE0150D	8.658	TSD	1,3	0,5
60-085ECE0150E	8.658	TSD	1,3	0,5
61-085ECE0170D	14.291	TSD	1,3	0,4
62-085ECE0170E	14.291	TSD	1,3	0,4
63-090ECE0010D	7.244	TSD	1,3	0,6
64-090ECE0010E	7.244	TSD	1,3	0,5
65-341ECE0010D	11.561	AAUQ	1,1	0,3
66-341ECE0010E	11.561	AAUQ	1,2	0,3
67-341ECE0030D	4.434	AAUQ	1,1	0,2
68-341ECE0030E	4.434	AAUQ	1,2	0,2
69-341ECE0050D	12.565	AAUQ	1,2	0,2
70-341ECE0050E	12.565	AAUQ	1,2	0,2
71-341ECE0070D	20.903	TSD	1,4	0,4
72-341ECE0070E	20.903	TSD	1,4	0,4

Na Tabela 5.29 são apresentados os dados com os resultados do IRI para os 42 trechos nas três posições dos sensores, com os valores, respectivamente, do IRI médio e do desvio padrão.

Tabela 5.29 Resultados do IRI nas três posições dos sensores, do IRI médio e do desvio padrão dos 42 trechos da RMF (Julho, 2006)

Trecho	Sensor Normal		Sensor LD			Sensor LE			IRI Médio	Desvio Padrão (σ)
	IRI_{int}	IRI_{ext}	IRI_{int}	IRI_{C}	IRI_{ext}	IRI_{ext}	IRI_{C}	IRI_{int}		
25-060ECE0010D	3,40	3,63	3,52	3,57	3,65	3,51	3,49	3,51	3,54	0,080
26-060ECE0010E	3,09	3,01	2,75	2,79	2,83	3,00	2,96	2,95	2,88	0,103
27-060ECE0030D	3,99	3,59	3,43	3,60	3,82	3,60	3,49	3,49	3,57	0,139
28-060ECE0030E	2,91	3,08	2,89	3,08	3,21	3,09	3,11	3,13	3,09	0,106
29-060ECE0050D	3,17	3,02	2,87	2,92	2,98	3,13	3,12	3,10	3,02	0,112
30-060ECE0050E	3,02	2,89	2,84	2,89	2,95	3,32	3,08	3,14	3,04	0,179
31-060ECE0070D	2,89	2,89	2,86	2,86	2,87	2,96	2,94	2,95	2,90	0,041
32-060ECE0070E	2,62	2,65	2,68	2,71	2,74	2,74	2,62	2,63	2,67	0,051
33-060ECE0090D	3,09	3,31	3,02	3,10	3,22	3,01	2,97	2,98	3,09	0,121
34-060ECE0090E	2,92	3,08	3,18	3,22	3,27	3,35	3,06	3,11	3,20	0,106
35-060ECE0110D	2,97	2,89	2,64	2,78	2,93	2,90	2,84	2,86	2,85	0,103
36-060ECE0110E	2,92	3,23	3,10	3,24	3,38	2,95	2,89	2,87	3,07	0,193
37-060ECE0130D	2,57	2,17	2,09	2,15	2,25	2,46	2,41	2,38	2,31	0,170
38-060ECE0130E	2,64	2,58	2,43	2,56	2,67	2,65	2,60	2,58	2,59	0,075
39-060ECE0150D	2,78	2,60	2,44	2,59	2,7	2,77	2,72	2,70	2,66	0,113
40-060ECE0150E	2,98	3,07	2,78	2,97	3,19	2,88	2,83	2,81	2,94	0,141
47-085ECE0030D	4,59	4,92	4,92	5,22	5,33	4,83	4,86	4,85	5,00	0,217
48-085ECE0030E	5,66	5,57	5,40	5,81	5,95	4,82	4,77	4,84	5,27	0,531
49-085ECE0050D	3,67	3,64	3,59	3,65	3,78	3,76	3,73	3,65	3,69	0,074
50-085ECE0050E	3,97	4,41	4,89	5,02	5,23	4,58	4,56	4,58	4,81	0,281
51-085ECE0070D	3,31	3,57	3,45	3,56	3,67	3,33	3,34	3,37	3,45	0,137
52-085ECE0070E	3,36	3,80	3,66	3,75	3,83	3,37	3,36	3,39	3,56	0,212
53-085ECE0090D	3,16	3,46	3,39	3,41	3,52	3,23	3,24	3,27	3,34	0,127
54-085ECE0090E	3,32	3,88	3,36	3,41	3,49	3,22	3,26	3,37	3,35	0,099
55-085ECE0110D	3,21	3,39	3,6	3,63	3,66	3,25	3,3	3,38	3,47	0,181
56-085ECE0110E	3,39	3,56	3,42	3,43	3,5	3,36	3,38	3,36	3,41	0,054
57-085ECE0130D	3,12	3,21	3,48	3,40	3,38	3,15	3,19	3,22	3,30	0,134
58-085ECE0130E	2,92	3,48	3,32	3,32	3,32	3,05	3,07	3,12	3,20	0,133
59-085ECE0150D	3,04	3,29	3,40	3,40	3,50	3,06	3,12	3,14	3,27	0,184
60-085ECE0150E	3,31	4,44	3,69	3,74	3,84	3,06	3,12	3,14	3,43	0,360
61-085ECE0170D	2,98	3,07	3,02	3,02	3,08	2,85	2,88	2,92	2,96	0,091
62-085ECE0170E	3,12	3,26	3,13	3,18	3,22	2,97	2,96	2,99	3,08	0,115
63-090ECE0010D	4,32	4,61	4,59	4,87	5,08	4,67	4,56	4,42	4,70	0,238
64-090ECE0010E	4,34	4,04	3,78	3,87	3,97	4,40	4,25	4,10	4,06	0,235
65-341ECE0010D	3,15	3,12	2,97	3,02	3,1	2,98	3,04	3,08	3,06	0,066
66-341ECE0010E	2,87	2,94	2,86	2,94	3,01	2,85	2,88	2,92	2,91	0,054
67-341ECE0030D	2,25	2,11	2,05	2,15	2,25	2,49	2,43	2,33	2,28	0,167
68-341ECE0030E	2,34	2,35	2,20	2,24	2,29	2,33	2,32	2,26	2,29	0,054
69-341ECE0050D	2,28	2,03	1,93	2,00	2,08	2,32	2,27	2,22	2,14	0,149
70-341ECE0050E	2,26	2,22	2,06	2,13	2,23	2,20	2,17	2,10	2,17	0,069
71-341ECE0070D	2,55	2,45	2,43	2,46	2,56	2,47	2,48	2,47	2,48	0,047
72-341ECE0070E	2,69	2,39	2,32	2,33	2,39	2,57	2,54	2,54	2,47	0,133

A análise básica dos dados da Tabela 5.29, com os resultados do IRI para os 42 trechos nas 3 posições dos sensores, permite que sejam feitas as seguintes observações iniciais:

- Os valores do desvio padrão das 8 medidas de cada trecho comprovam a uniformidade e a precisão dos resultados. Os trechos 085ECE0030, 085ECE0050E e 090ECE0010 apresentam os maiores valores do IRI Médio e também do desvio padrão.
- O valor do $\mathbf{IRI_{int}}$, medido com o sensor L1 (situado atrás do motorista), no lado interno da faixa, independe da disposição dos sensores na posição normal ou no LE. Portanto, a utilização da barra (haste) de 1,40 m, não influenciou, nestes trechos desta pesquisa, no resultado do $\mathbf{IRI_{int}}$. No Capítulo 6 estes valores serão analisados em detalhes,
- Verifica-se que as diferenças entre os valores do $\mathbf{IRI_I}$ e do $\mathbf{IRI_E}$, este último na trilha externa da faixa, são mais acentuadas para medidas do IRI acima de três, Os modelos de correlações serão apresentados no Capítulo 6.

5.4.7 Determinação do Número Estrutural Corrigido dos trechos em estudo

O número estrutural corrigido (NEC) é um importante parâmetro para ser analisado nos modelos de previsão de desempenho por ser um indicador da resistência estrutural dos pavimentos, além de considerar uma parcela de avaliação de eficiência do sistema de drenagem. O NEC é reconhecido, sob o ponto de vista estatístico, como a medida mais significativa da resistência ao cisalhamento dos pavimentos nas relações de previsão de desempenho (DNER, 1998).

Para a determinação dos valores do NEC dos trechos deste estudo, foi utilizada a sua correlação com a deflexão máxima do pavimento. Os cálculos foram efetuados diretamente no *software* HDM 4, através da equação 2.16 do Capítulo 2, utilizando os dados das deflexões (DEF) medidas com o FWD em 2001, citados na Tabela 5.1 e os resultados são mostrados na Tabela 5.30.

A deflexão de um pavimento é um parâmetro que segue o modelo de desempenho mostrado na Figura 5.23 (DNER PRO 10 e PRO 11).

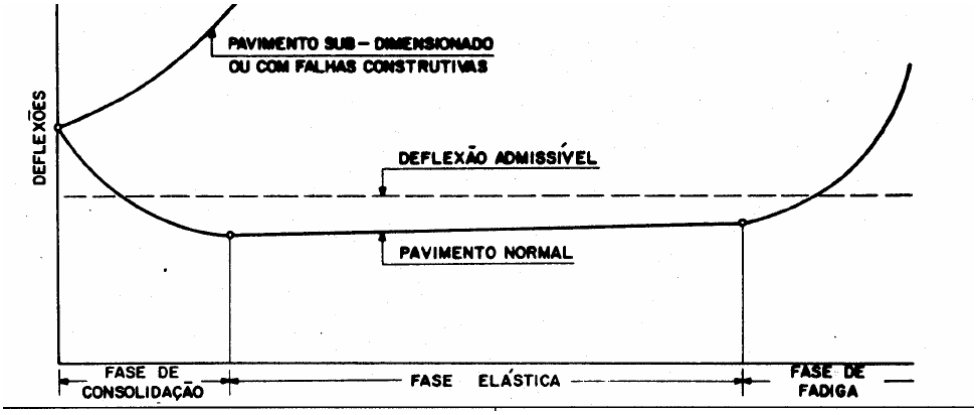


Figura 5.23 Curva de desempenho estrutural de um pavimento por medidas de deflexão (PRO 10 e PRO 11)

Esta forma de modelo de desempenho é conhecida nos estudos de confiabilidade de modelos estruturais de fadiga como "curva da banheira" (MOTTA, 1991).

No caso do pavimento bem dimensionado e corretamente construído, na maior parte de sua vida útil ele apresentará um nível de deflexão constante (ou praticamente constante, dentro da própria variabilidade do método de medida empregado) e só começará a aumentar este nível de deformabilidade quando surgirem as primeiras trincas, que são a conseqüência direta e visível da fadiga do revestimento.

Portanto, quando não se tem medidas de deflexão a várias idades do pavimento, é possível se admitir por hipótese, baseada no modelo genérico de desempenho de pavimento por deflexão, que, caso entre duas datas distintas de avaliação funcional de um trecho de pavimento, as porcentagens de áreas trincadas não sejam diferentes entre si, o nível de deflexão continue o mesmo medido na primeira data da avaliação funcional.

A utilização dos dados de deflexão medidos em 2001 neste estudo, a última efetuada pelo DERT-CE, se justifica, por se saber que na opinião dos especialistas, tradicionalmente, nas rodovias da RMF as variações nos resultados das deflexões são pequenas e não sofrem grandes alterações em pouco tempo. Além disso, foram também considerados, as condições climáticas da RMF, o tráfego que é médio ou baixo, os resultados dos afundamentos medidos no LVC e as poucas variações nas porcentagens das áreas trincadas entre as avaliações de 2001 e as atuais na maioria dos trechos desta pesquisa.

Tabela 5,30 Resultados do NEC dos 72 trechos da RMF calculados através do *software* HDM 4 (Agosto, 2006)

Trecho	Deflexão (1/100 mm)	NEC
01-025ECE0010D	41	5,61
02-025ECE0010E	39	5,79
03-025ECE0030D	45	5,29
04-025ECE0030E	45	5,29
05-025ECE0050D	30	6,83
06-025ECE0050E	32	6,56
07-040ECE0010D	32	6,56
08-040ECE0010E	36	6,09
09-040ECE0030D	26	7,48
10-040ECE0030E	29	6,98
11-040ECE0050D	23	8,08
12-040ECE0050E	25	7,66
13-040ECE0070D	30	6,83
14-040ECE0070E	30	6,83
15-040ECE0090D	29	6,98
16-040ECE0090E	25	7,66
17-040ECE0110D	34	6,31
18-040ECE0110E	40	5,70
19-040ECE0130D	29	6,98
20-040ECE0130E	29	6,98
21-040ECE0150D	26	7,48
22-040ECE0150E	26	7,48
23-040ECE0170D	29	6,98
24-040ECE0170E	29	6,98
25-060ECE0010D	44	5,37
26-060ECE0010E	42	5,53
27-060ECE0030D	36	6,09
28-060ECE0030E	33	6,43
29-060ECE0050D	42	5,53
30-060ECE0050E	44	5,37
31-060ECE0070D	39	5,79
32-060ECE0070E	42	5,53
33-060ECE0090D	36	6,09
34-060ECE0090E	36	6,09
35-060ECE0110D	45	5,29
36-060ECE0110E	45	5,29
37-060ECE0130D	33	6,43
38-060ECE0130E	33	6,43
39-060ECE0150D	35	6,20
40-060ECE0150E	35	6,20
41-065ECE0010D	55	4,66
42-065ECE0010E	55	4,66
43-065ECE0030D	30	6,83
44-065ECE0030E	34	6,31

Tabela 5,30 Resultados do NEC dos 72 trechos da RMF calculados através do *software* HDM 4 (Agosto, 2006)

Trecho	Deflexão (1/100 mm)	NEC
45-065ECE0050D	34	6,31
46-065ECE0050E	34	6,31
47-085ECE0030D	56	4,61
48-085ECE0030E	56	4,61
49-085ECE0050D	49	5,02
50-085ECE0050E	49	5,02
51-085ECE0070D	50	4,95
52-085ECE0070E	50	4,95
53-085ECE0090D	43	5,45
54-085ECE0090E	43	5,45
55-085ECE0110D	55	4,66
56-085ECE0110E	55	4,66
57-085ECE0130D	54	4,72
58-085ECE0130E	54	4,72
59-085ECE0150D	66	4,16
60-085ECE0150E	66	4,16
61-085ECE0170D	58	4,51
62-085ECE0170E	58	4,51
63-090ECE0010D	42	5,53
64-090ECE0010E	42	5,53
65-341ECE0010D	39	5,79
66-341ECE0010E	41	5,61
67-341ECE0030D	41	5,61
68-341ECE0030E	41	5,61
69-341ECE0050D	38	5,89
70-341ECE0050E	38	5,89
71-341ECE0070D	38	5,89
72-341ECE0070E	38	5,89

CAPÍTULO 6

MODELOS DE DESEMPENHO E ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS COM OS MODELOS DO HDM 4

6.1 Introdução

Esta pesquisa tem como objetivo principal, estabelecer modelos de previsão de desempenho de pavimentos asfálticos do Ceará para um Sistema de Gerência de Pavimentos. Para tanto, foram desenvolvidos modelos probabilísticos e modelos de regressão estatística ou de inferência estatística.

Nos modelos probabilísticos foram utilizadas as matrizes de transição de Markov, apresentadas no Capítulo anterior para cada tipo de revestimento, CBUQ, AAUQ e TSD, para a previsão de desempenho dos pavimentos em função do ICP. Para o estabelecimento dos vetores estado inicial dos trechos, também apresentados no capítulo anterior, foi considerada a situação atual do pavimento.

Nos modelos de regressão foram estabelecidas equações de previsão por meio dos programas *Microsoft Office Excel* e SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*), utilizando a Análise da Variância (ANOVA). Foram determinadas equações de evolução para os defeitos/severidade efetuados pelo LVC em 2004 e 2005, assim como equações de regressão que relacionam os valores do IRI obtidos com o perfilômetro inercial a laser. Também foram estabelecidas equações relacionando o IRI com os defeitos indicados pelo LVC, com os valores do ICP dos modelos probabilísticos, com a deflexão e com o número estrutural corrigido. Para comparar o modelo de previsão da condição do pavimento pelo IRI obtido nesta pesquisa com o de outra referência foi escolhido o estudo de DEWAN e SMITH (2002). Modelos de regressão múltipla relacionando a evolução do IRI com o ICP, a deflexão e os defeitos/severidade foram também estabelecidos.

O *software* HDM 4 foi usado para analisar, a partir de estratégias de manutenção propostas, a evolução da irregularidade longitudinal em alguns trechos escolhidos. Também foi analisado pelo HDM 4, em um estudo de caso, o resumo dos indicadores econômicos de um dos trechos desta pesquisa, em função das estratégias propostas, a título de exemplo ilustrativo das potencialidades desta ferramenta.

O tráfego foi considerado neste estudo, com conceitos médio ou baixo, principalmente nos trechos em AAUQ e TSD, devido a preponderarem os carros de passeio na composição da frota de veículos, de acordo com as contagens de tráfego de 2004. Em alguns trechos em CBUQ, principalmente os da CE-040, a porcentagem de carros de passeio é ainda maior, daí o VMD, aparentemente alto, não caracterizar tráfego alto. A Tabela 6.1 mostra dados de contagem de tráfego de trechos da CE 040 de 2004, verificando-se que por ser uma zona urbana, a porcentagem de carro de passeio chega a ser de mais de 91%.

Tabela 6.1 Dados de contagem de tráfego de trechos da CE 040 de 2004

Trecho	VMD Total	C. P.	ON.	Cam.L	Cam M.	Cam. P.	R.	SR
040ECE0010D	50.062	48.390	1.004	418	-	174	16	60
040ECE0010E	46.122	43.995	1.116	552	-	231	15	213
040ECE0030D	15.330	13.872	630	488	-	270	12	58
040ECE0030E	14.230	12.940	574	410	-	230	8	68
040ECE0050D	9.360	8.232	228	396	-	306	14	184
040ECE0050E	8.214	7.374	234	262	-	264	16	64
040ECE0070D	10.364	9.242	196	452	-	398	4	72
040ECE0070E	9.772	8.798	174	408	-	344	8	40
040ECE0090D	5.768	4.880	216	332	-	288	8	44
040ECE0090E	5.662	4.916	200	262	-	260	6	18
040ECE0110D	6.320	5.220	290	430	354	26	0	0
040ECE0110E	6.320	5.220	290	430	354	26	0	0
040ECE0130D	4.149	3.442	170	261	-	255	0	21
040ECE0130E	4.523	3.795	173	286	-	257	2	10
040ECE0150D	3.406	2.458	112	206	-	611	1	18
040ECE0150E	3.261	2.655	123	226	-	247	1	9
Total	202.863	185.429	5.730	5.819	708	4.187	111	879
Porcentagem	100,00	91,41	2,82	2,87	0,35	2,06	0,05	0,43

Onde:

C.P. – Carro de passeio;

ON – Ônibus;

Cam. L – Caminhão leve;

Cam. M – Caminhão médio;

Cam. P – Caminhão pesado;

R – Reboque;

SR – Semi-Reboque.

6.2 Modelos probabilísticos

6.2.1 Considerações iniciais

A previsão de deterioração utilizando o processo de Markov, por meio de princípios probabilísticos, em modelos de desempenho dos pavimentos asfálticos tem sido utilizada desde os anos 1970. Como exemplo, modelos de previsão de desempenho para a manutenção da rede de pavimentos de Waterloo-Ontario (Canadá) foram desenvolvidos por KARAN, et al. (1983[1], apud YSHIBA, 2003), onde cada matriz de transição foi construída, tendo como embasamento as opiniões dos especialistas, de forma subjetiva, através de questionários. MACLEOD e WALSH (1998) utilizaram o processo de Markov, em uma rede de rodovias no norte do Canadá, considerando a condição atual do pavimento para o estabelecimento do vetor estado inicial. Outros organismos rodoviários implantaram modelos de previsão de desempenho de pavimento utilizando o processo de Markov, dentre eles, o sistema de gerência Micro-Paver (BUTT et al., 1988).

6.2.2 Resultados e análises dos modelos probabilísticos dos trechos desta pesquisa

As curvas de desempenho obtidas, neste estudo, a partir das matrizes de probabilidade e dos vetores estado inicial, fundamentam a análise dos modelos probabilísticos. As projeções foram feitas partindo-se do ano de início, 2006 (P_0) até o ano 2016 (P_{10}). Os 72 trechos escolhidos foram selecionados por tipo de revestimento, uma vez que as matrizes de transição foram determinadas com esta finalidade. São 10 trechos em AAUQ, 20 trechos em TSD e 42 trechos em CBUQ. As Tabelas 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam os valores da curva de desempenho do ICP dos trechos da RMF escolhidos nesta pesquisa, com revestimento em AAUQ, TSD e CBUQ, respectivamente.

Tabela 6,2 Valores da curva de desempenho do ICP dos trechos com revestimento em AAUQ pelo Processo de Markov,

Trecho	Tipo Rev,	Valores do ICP do ano atual até o 10º ano,										
		(P_0)	(P_1)	(P_2)	(P_3)	(P_4)	(P_5)	(P_6)	(P_7)	(P_8)	(P_9)	(P_{10})
03-025ECE0030D	AAUQ	68,00	65,00	61,79	58,53	55,19	51,69	47,99	44,11	40,09	36,05	32,09
04-025ECE0030E	AAUQ	68,00	65,00	61,79	58,53	55,19	51,69	47,99	44,11	40,09	36,05	32,09
05-025ECE0050D	AAUQ	86,00	84,00	81,82	79,49	77,03	74,43	71,72	68,90	65,95	62,87	59,66
06-025ECE0050E	AAUQ	86,50	84,50	82,33	80,02	77,57	75,00	72,32	69,52	66,60	63,54	60,36
65-341ECE0010D	AAUQ	82,00	79,70	77,26	74,68	71,98	69,16	66,22	63,16	59,96	56,62	53,16
66-341ECE0010E	AAUQ	82,00	79,70	77,26	74,68	71,98	69,16	66,22	63,16	59,96	56,62	53,16
67-341ECE0030D	AAUQ	85,00	83,00	80,80	78,44	75,93	73,30	70,54	67,66	64,66	61,53	58,26
68-341ECE0030E	AAUQ	85,00	83,00	80,80	78,44	75,93	73,30	70,54	67,66	64,66	61,53	58,26
69-341ECE0050D	AAUQ	89,00	87,00	84,88	82,65	80,30	77,85	75,28	72,61	69,82	66,91	63,87
70-341ECE0050E	AAUQ	89,00	87,00	84,88	82,65	80,30	77,85	75,28	72,61	69,82	66,91	63,87

[1] KARAN, M.A., CHRISTISON, T.S. e BERDAHL, G., 1983, "Development Implementation of Alberta´s Pavement Information and Needs System". In: *Transportation Research Record*, n. 938.

Tabela 6.3 Valores da curva de desempenho do ICP dos trechos com revestimento em TSD pelo Processo de Markov.

Trecho	Tipo Rev,	Valores do ICP do ano atual até o 10º ano,										
		(P_0)	(P_1)	(P_2)	(P_3)	(P_4)	(P_5)	(P_6)	(P_7)	(P_8)	(P_9)	(P_{10})
47-085ECE0030D	TSD	63,50	60,35	57,04	53,66	50,14	46,42	42,47	38,36	34,20	30,14	26,31
48-085ECE0030E	TSD	57,00	53,20	49,82	46,24	42,32	38,09	33,69	29,33	25,23	21,53	18,32
49-085ECE0050D	TSD	72,50	69,50	66,43	63,28	60,05	56,72	53,24	49,60	45,81	41,92	37,99
50-085ECE0050E	TSD	65,00	62,00	58,70	55,37	51,95	48,34	44,49	40,44	36,27	32,13	28,16
51-085ECE0070D	TSD	76,00	73,05	70,09	67,03	63,91	60,70	57,39	53,93	50,31	46,55	42,68
52-085ECE0070E	TSD	76,00	73,05	70,09	67,03	63,91	60,70	57,39	53,93	50,31	46,55	42,68
53-085ECE0090D	TSD	76,00	73,05	70,09	67,03	63,91	60,70	57,39	53,93	50,31	46,55	42,68
54-085ECE0090E	TSD	72,00	69,00	65,91	62,75	59,51	56,16	52,66	48,99	45,18	41,26	37,33
55-085ECE0110D	TSD	76,00	73,05	70,09	67,03	63,91	60,70	57,39	53,93	50,31	46,55	42,68
56-085ECE0110E	TSD	76,00	73,05	70,09	67,03	63,91	60,70	57,39	53,93	50,31	46,55	42,68
57-085ECE0130D	TSD	80,00	77,25	74,44	71,53	68,55	65,48	62,31	59,02	55,60	52,04	48,37
58-085ECE0130E	TSD	75,00	72,00	69,00	65,91	62,75	59,51	56,16	52,66	48,99	45,18	41,26
59-085ECE0150D	TSD	80,00	77,25	74,44	71,53	68,55	65,48	62,31	59,02	55,60	52,04	48,37
60-085ECE0150E	TSD	68,00	65,00	61,79	58,53	55,19	51,69	47,99	44,11	40,09	36,05	32,09
61-085ECE0170D	TSD	82,00	79,35	76,61	73,78	70,87	67,86	64,77	61,57	58,24	54,78	51,21
62-085ECE0170E	TSD	80,00	77,25	74,44	71,53	68,55	65,48	62,31	59,02	55,60	52,04	48,37
63-090ECE0010D	TSD	68,00	65,00	61,79	58,53	55,19	51,69	47,99	44,11	40,09	36,05	32,09
64-090ECE0010E	TSD	70,00	67,00	63,85	60,64	57,35	53,92	50,33	46,55	42,63	38,65	34,71
71-341ECE0070D	TSD	85,00	82,50	79,88	77,16	74,34	71,45	68,46	65,38	62,20	58,90	55,47
72-341ECE0070E	TSD	85,00	82,50	79,88	77,16	74,34	71,45	68,46	65,38	62,20	58,90	55,47

Verifica-se que em função das matrizes de transição sugeridas pelos especialistas, que os decréscimos dos valores do ICP são ligeiramente mais acentuados nos trechos em TSD, do que nos trechos com revestimento em AAUQ. Isto também se verifica se compararmos os decréscimos do ICP dos trechos em AAUQ e CBUQ. Os decréscimos são maiores nos trechos em AAUQ.

A assertiva acima citada pode ser constatada, se tomarmos como exemplos, e compararmos, os valores projetados nas curvas de desempenho dos trechos 085ECE0170D em TSD, 341ECE0010E em AAUQ e 060ECE0150D em CBUQ, mostrados nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, respectivamente, com as planilhas de cálculos e respectivos gráficos. Os trechos desta comparação têm um ICP (P_0) igual a 82.

Tabela 6.4 Valores da curva de desempenho do ICP dos trechos com revestimento em CBUQ pelo Processo de Markov.

Trecho	Tipo Rev,	Valores do ICP do ano atual até o 10º ano,										
		(P_0)	(P_1)	(P_2)	(P_3)	(P_4)	(P_5)	(P_6)	(P_7)	(P_8)	(P_9)	(P_{10})
01-025ECE0010D	CBUQ	73,00	70,80	68,44	65,96	63,38	60,69	57,90	54,98	51,93	48,78	45,55
02-025ECE0010E	CBUQ	74,00	71,90	69,62	67,20	64,67	62,04	59,30	56,44	53,45	50,36	47,17
07-040ECE0010D	CBUQ	80,50	78,50	76,41	74,23	71,95	69,59	67,14	64,59	61,94	59,18	56,31
08-040ECE0010E	CBUQ	83,00	81,00	78,96	76,86	74,68	72,42	70,07	67,64	65,11	62,47	59,73
09-040ECE0030D	CBUQ	86,50	84,58	82,64	80,66	78,62	76,50	74,31	72,03	69,67	67,21	64,65
10-040ECE0030E	CBUQ	80,00	78,00	75,90	73,70	71,41	69,03	66,56	63,98	61,31	58,52	55,63
11-040ECE0050D	CBUQ	92,00	90,35	88,65	86,89	85,07	83,18	81,23	79,20	77,10	74,92	72,66
12-040ECE0050E	CBUQ	92,00	90,35	88,65	86,89	85,07	83,18	81,23	79,20	77,10	74,92	72,66
13-040ECE0070D	CBUQ	93,00	91,40	89,74	88,02	86,24	84,40	82,49	80,51	78,46	76,33	74,12
14-040ECE0070E	CBUQ	93,00	91,40	89,74	88,02	86,24	84,40	82,49	80,51	78,46	76,33	74,12
15-040ECE0090D	CBUQ	87,00	85,10	83,19	81,23	79,20	77,11	74,94	72,68	70,34	67,91	65,38
16-040ECE0090E	CBUQ	87,00	85,10	83,19	81,23	79,20	77,11	74,94	72,68	70,34	67,91	65,38
17-040ECE0110D	CBUQ	84,00	82,00	79,98	77,91	75,77	73,55	71,25	68,86	66,37	63,79	61,10
18-040ECE0110E	CBUQ	80,00	78,00	75,90	73,70	71,41	69,03	66,56	63,98	61,31	58,52	55,63
19-040ECE0130D	CBUQ	91,50	89,83	88,10	86,32	84,48	82,57	80,60	78,55	76,43	74,22	71,93
20-040ECE0130E	CBUQ	91,50	89,83	88,10	86,32	84,48	82,57	80,60	78,55	76,43	74,22	71,93
21-040ECE0150D	CBUQ	91,50	89,83	88,10	86,32	84,48	82,57	80,60	78,55	76,43	74,22	71,93
22-040ECE0150E	CBUQ	91,50	89,83	88,10	86,32	84,48	82,57	80,60	78,55	76,43	74,22	71,93
23-040ECE0170D	CBUQ	91,50	89,83	88,10	86,32	84,48	82,57	80,60	78,55	76,43	74,22	71,93
24-040ECE0170E	CBUQ	91,50	89,83	88,10	86,32	84,48	82,57	80,60	78,55	76,43	74,22	71,93
25-060ECE0010D	CBUQ	77,00	75,00	72,84	70,54	68,14	65,64	63,04	60,33	57,51	54,57	51,52
26-060ECE0010E	CBUQ	81,00	79,00	76,92	74,75	72,50	70,16	67,73	65,20	62,57	59,84	56,99
27-060ECE0030D	CBUQ	76,00	74,00	71,82	69,49	67,05	64,51	61,87	59,11	56,24	53,25	50,15
28-060ECE0030E	CBUQ	80,00	78,00	75,90	73,70	71,41	69,03	66,56	63,98	61,31	58,52	55,63
29-060ECE0050D	CBUQ	81,50	79,50	77,43	75,28	73,04	70,72	68,31	65,81	63,21	60,49	57,68
30-060ECE0050E	CBUQ	81,50	79,50	77,43	75,28	73,04	70,72	68,31	65,81	63,21	60,49	57,68
31-060ECE0070D	CBUQ	83,50	81,50	79,47	77,38	75,22	72,98	70,66	68,25	65,74	63,13	60,42
32-060ECE0070E	CBUQ	83,50	81,50	79,47	77,38	75,22	72,98	70,66	68,25	65,74	63,13	60,42
33-060ECE0090D	CBUQ	81,00	79,00	76,92	74,75	72,50	70,16	67,73	65,20	62,57	59,84	56,99
34-060ECE0090E	CBUQ	81,00	79,00	76,92	74,75	72,50	70,16	67,73	65,20	62,57	59,84	56,99
35-060ECE0110D	CBUQ	82,00	80,00	77,94	75,80	73,59	71,29	68,90	66,42	63,84	61,15	58,36
36-060ECE0110E	CBUQ	82,00	80,00	77,94	75,80	73,59	71,29	68,90	66,42	63,84	61,15	58,36
37-060ECE0130D	CBUQ	84,00	82,00	79,98	77,91	75,77	73,55	71,25	68,86	66,37	63,79	61,10
38-060ECE0130E	CBUQ	84,00	82,00	79,98	77,91	75,77	73,55	71,25	68,86	66,37	63,79	61,10
39-060ECE0150D	CBUQ	82,00	80,00	77,94	75,80	73,59	71,29	68,90	66,42	63,84	61,15	58,36
40-060ECE0150E	CBUQ	82,00	80,00	77,94	75,80	73,59	71,29	68,90	66,42	63,84	61,15	58,36
41-065ECE0010D	CBUQ	57,00	54,00	51,12	48,07	44,79	41,28	37,61	33,88	30,20	26,69	23,44
42-065ECE0010E	CBUQ	47,00	44,40	40,95	37,13	33,10	29,05	25,17	21,62	18,50	15,85	13,67
43-065ECE0030D	CBUQ	85,00	83,00	81,00	78,96	76,86	74,68	72,42	70,07	67,64	65,11	62,47
44-065ECE0030E	CBUQ	87,50	85,63	83,73	81,79	79,79	77,71	75,56	73,33	71,02	68,61	66,11
45-065ECE0050D	CBUQ	87,50	85,63	83,73	81,79	79,79	77,71	75,56	73,33	71,02	68,61	66,11
46-065ECE0050E	CBUQ	87,50	85,63	83,73	81,79	79,79	77,71	75,56	73,33	71,02	68,61	66,11

Rodovia: CE 085 **Trecho:** 085ECE00170D

Segmento: ENT, CE-423 (SÃO GONÇALO) - ENT, 341 (QUATRO BOCAS)

Revestimento: TSD

					P_o (estado atual)						
ANO 0	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
					P						
MATRIZ	0,75	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,00	0,75	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,40	0,00	0,10	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00	
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	
ANO 1	0,00	0,53	0,39	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ANO 2	0,00	0,39	0,40	0,18	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ANO 3	0,00	0,30	0,38	0,25	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
ANO 4	0,00	0,22	0,34	0,29	0,12	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	
ANO 5	0,00	0,17	0,29	0,30	0,15	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	
ANO 6	0,00	0,12	0,25	0,30	0,18	0,10	0,03	0,01	0,01	0,00	
ANO 7	0,00	0,09	0,20	0,28	0,20	0,13	0,06	0,02	0,02	0,01	
ANO 8	0,00	0,07	0,17	0,26	0,20	0,16	0,08	0,04	0,03	0,02	
ANO 9	0,00	0,05	0,13	0,23	0,20	0,18	0,11	0,06	0,05	0,03	
ANO 10	0,00	0,04	0,11	0,20	0,19	0,19	0,12	0,08	0,08	0,06	
ÍNDICES	95	85	75	65	55	45	35	25	15	5	

TEMPO	ICP
ANO 0	82,00
ANO 1	79,35
ANO 2	76,61
ANO 3	73,78
ANO 4	70,87
ANO 5	67,86
ANO 6	64,77
ANO 7	61,57
ANO 8	58,24
ANO 9	54,78
ANO 10	51,21

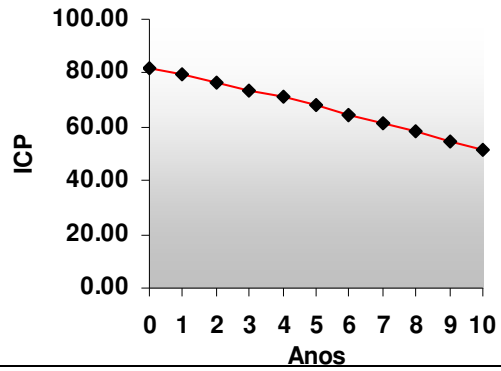


Figura 6.1 Resultados do processo de Markov, trecho 085ECE170D em TSD

Rodovia: CE 341

Trecho: 341ECE0010 E

Segmento: ENTR.CE-348(PARACURU)-ENTR.CE-085(4 BOCAS)

Revestimento: AAUQ

	P_o (estado atual)									
ANO 0	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
					P					
MATRIZ	0,80	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,80	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,40	0,00	0,10	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
ANO 1	0,00	0,56	0,35	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ANO 2	0,00	0,45	0,36	0,17	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ANO 3	0,00	0,36	0,34	0,22	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
ANO 4	0,00	0,29	0,31	0,26	0,11	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
ANO 5	0,00	0,23	0,27	0,27	0,14	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00
ANO 6	0,00	0,18	0,24	0,27	0,17	0,09	0,03	0,01	0,01	0,00
ANO 7	0,00	0,15	0,20	0,26	0,18	0,12	0,05	0,02	0,02	0,01
ANO 8	0,00	0,12	0,17	0,25	0,19	0,15	0,08	0,04	0,03	0,02
ANO 9	0,00	0,09	0,14	0,22	0,19	0,16	0,10	0,06	0,05	0,03
ANO 10	0,00	0,08	0,12	0,20	0,18	0,17	0,11	0,08	0,07	0,06
ÍNDICES	95	85	75	65	55	45	35	25	15	5

TEMPO	**ICP**
ANO 0	82,00
ANO 1	79,70
ANO 2	77,26
ANO 3	74,68
ANO 4	71,98
ANO 5	69,16
ANO 6	66,22
ANO 7	63,16
ANO 8	59,96
ANO 9	56,62
ANO 10	53,16

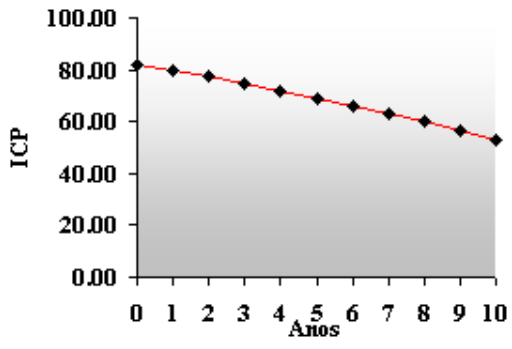


Figura 6.2 Resultados do processo Markov, trecho 341ECE0010E em AAUQ

Rodovia: CE 060

Trecho: 060ECE0150D

Segmento: ENTR.CE-354(A)-ENTR.CE-253(A)/354(B)(ACARAPE)

Revestimento: CBUQ

	P_o (estado atual)									
ANO 0	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	P									
MATRIZ	0,85	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,80	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,80	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,40	0,00	0,10	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,40	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,40	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
ANO 1	0,00	0,56	0,38	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ANO 2	0,00	0,45	0,42	0,12	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ANO 3	0,00	0,36	0,42	0,17	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
ANO 4	0,00	0,29	0,41	0,20	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
ANO 5	0,00	0,23	0,39	0,22	0,12	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00
ANO 6	0,00	0,18	0,35	0,23	0,15	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00
ANO 7	0,00	0,15	0,32	0,23	0,17	0,08	0,03	0,01	0,01	0,00
ANO 8	0,00	0,12	0,29	0,23	0,19	0,10	0,05	0,02	0,02	0,01
ANO 9	0,00	0,09	0,25	0,22	0,20	0,12	0,07	0,03	0,03	0,02
ANO 10	0,00	0,08	0,22	0,20	0,21	0,13	0,09	0,05	0,04	0,03
ÍNDICES	95	85	75	65	55	45	35	25	15	5

TEMPO	ICP
ANO 0	82,00
ANO 1	80,00
ANO 2	77,94
ANO 3	75,80
ANO 4	73,59
ANO 5	71,29
ANO 6	68,90
ANO 7	66,42
ANO 8	63,84
ANO 9	61,15
ANO 10	58,36

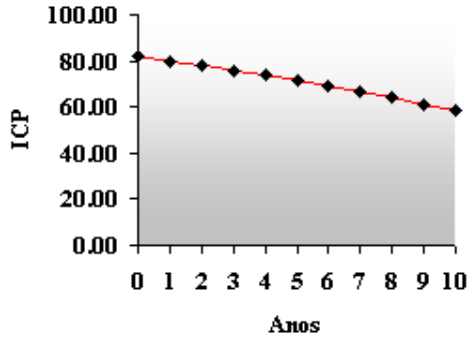


Figura 6.3 Resultados processo de Markov, trecho 060ECE0150D em CBUQ

6.2.3 Análise das estratégias de M&R em função do ICP

Os resultados apresentados para o ICP nas Tabelas 6.2, 6.3 e 6.4, possibilitam que sejam projetadas as estratégias de manutenção e reabilitação, M&R, para os trechos escolhidos nesta pesquisa, em função do tipo de revestimento, utilizando como critério a escala de valores e os conceitos do ICP apresentados no Capítulo 5, Tabela 5.13. Os valores limites adotados para intervenção, neste estudo, utilizando como estratégia o recapeamento grosso ou fino, foram estabelecidos a partir do ICP com o conceito regular, na escala entre 40 – 60.

- **Trechos com revestimento em AAUQ**

Para análise dos trechos em AAUQ, mostrados na Tabela 6.1, tomamos como exemplo, os trechos 025ECE0030D/E, que deverão atingir um ICP de 58,53 em 2009. Com este valor do ICP, conforme a Tabela 5.13, deverá ser efetuado um recapeamento naquele ano. Esta atividade poderá ser evitada ou adiada, se, por exemplo, for efetuada como estratégia de M&R, uma aplicação de lama asfáltica em 2007 ou 2008. As curvas de desempenho dos demais trechos projetam para o ano 2016 intervenções de recapeamento nos trechos 025ECE0050D/E, 341ECE0010D/E e 341ECE0030D/E, e lama, capa selante ou micro revestimento nos trechos 341ECE0050D/E.

- **Trechos com revestimento em TSD**

Nos trechos com revestimento em TSD, Tabela 6.2, verifica-se que no 085ECE0030E será necessário proceder a um recapeamento ainda em 2006. A postergação desta atividade poderá levar a condição do trecho para um conceito Ruim em 2011, quando deverá ser procedida uma restauração, com custos bem mais elevados. As curvas de desempenho projetam recapeamento nos trechos 085ECE0030D e 085ECE0050E em 2008, 085ECE0150E e 090ECE0010D em 2009, 085ECE0090E e 090ECE0010E em 2010, 085ECE0050D e 085ECE0130E em 2011, 085ECE0070D, 085ECE0070E, 085ECE0090D, 085ECE0110D e 085ECE0110E em 2012, 085ECE0130D, 085ECE0150D e 085ECE0170E em 2013, 085ECE0170D em 2014 e 341ECE0070D/E em 2015.

- **Trechos com revestimento em CBUQ**

Verifica-se, na análise da malha dos trechos em CBUQ, que a sua condição inicial pode ser considerada como boa, excluindo deste conceito os trechos 065ECE0010D/E, que necessitam de recapeamento ainda em 2006. Efetuadas as devidas manutenções de rotina, só deverão ser efetuados recapeamentos nos trechos 025ECE0010D/E em 2012,

060ECE0030D em 2013, 060ECE0010D em 2014, 060ECE0030E, 060ECE0090D/E, 040ECE0030E, 060ECE0010E, 040ECE0010D e 040ECE0110E em 2015, 040ECE0010E, 060ECE0050D/E, 060ECE0110D/E e 060ECE0150D/E em 2016.

6.3. Modelos estatísticos

Nos modelos obtidos com as equações de regressão correlacionando a evolução dos defeitos/severidades, as medidas do IRI e dos afundamentos, as deflexões, o número estrutural corrigido e também o ICP, foram realizados testes de significância formulando hipóteses estatísticas. O nível de significância representa a probabilidade de que seja nulo o efeito de uma determinada variável sobre o modelo de desempenho. Para tanto, neste estudo, os valores foram analisados considerando o nível de confiança de 95% e nível de significância de 5%, isto é, há uma probabilidade de 5 em 100, de a hipótese ser rejeitada, quando deveria ser aceita, em outras palavras, existe uma confiança de 95% de que a decisão tomada foi a certa. Alguns modelos da presente pesquisa, em função desta análise, foram determinados nas equações de regressão linear sem a constante (intercepto).

6.3.1 Equações de evolução dos defeitos/severidade pelo LVC

Nas análises dos resultados e para a determinação das equações de evolução dos defeitos/severidades, correlacionando trinca de fadiga (TF), trinca de bloco (TB), remendo (REM), afundamento (AFUND) e desgaste (DES), efetuados pelo LVC em 2004 (Tabela 5.1) e em 2005 (Tabela 5.11), foram selecionados 44 trechos entre os 72 escolhidos, Tabela 6.5. O autor desta pesquisa constatou que em alguns daqueles 72 trechos foram efetuados serviços de manutenção naquele período. Estes trechos estão fora da análise.

Os valores constantes na Tabela 6.5 foram agrupados por tipo de defeito, comparando os respectivos resultados em 2004 e 2005, sendo então geradas as equações de evolução para cada tipo de defeito considerando, nesta primeira análise, os três tipos de revestimento. Uma outra equação de evolução foi determinada utilizando como porcentagem da extensão trincada a soma da trinca de fadiga mais a trinca de bloco, seguindo procedimento adotado pelo DNIT nos levantamentos de defeitos. Os resultados são mostrados nas Figuras 6.4 a 6.9, com equações, coeficientes de

determinação (R^2) e gráficos para os respectivos defeitos. A Tabela 6.6 apresenta o resumo estatístico para o defeito trinca de fadiga. Os demais resumos estatísticos estão no Anexo III.

Tabela 6.5 Resultados dos defeitos pelo LVC dos 44 trechos selecionados na RMF

Código do Trecho	Rev.	Defeitos pelo LVC em 2004					Defeitos pelo LVC em 2005				
		TF	TB	REM	AFUND	DES	TF	TB	REM	AFUND	DES
025ECE0010D	CBUQ	1	1	1	0	0	7	2	1	0	0
025ECE0010E	CBUQ	1	1	1	0	0	7	2	1	0	0
025ECE0030D	AAUQ	1	1	1	0	0	15	4	0	0	0
025ECE0030E	AAUQ	1	1	1	0	0	15	4	0	0	0
040ECE0010D	CBUQ	2	1	1	0	0	1	2	2	0	0
040ECE0010E	CBUQ	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0
040ECE0070E	CBUQ	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
040ECE0090D	CBUQ	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
040ECE0090E	CBUQ	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
040ECE0130D	CBUQ	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
040ECE0130E	CBUQ	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
040ECE0150D	CBUQ	1	0	0	0	0	1	4	0	0	0
040ECE0150E	CBUQ	1	0	0	0	0	1	4	0	0	0
040ECE0170D	CBUQ	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
040ECE0170E	CBUQ	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
060ECE0010D	CBUQ	5	0	0	0	0	14	1	0	0	1
060ECE0010E	CBUQ	8	0	0	0	0	8	1	0	0	0
060ECE0030D	CBUQ	7	3	2	0	0	8	4	3	0	0
060ECE0030E	CBUQ	9	0	1	0	0	6	1	2	0	1
060ECE0050D	CBUQ	8	2	0	1	0	11	1	0	1	0
060ECE0050E	CBUQ	10	0	0	1	0	7	1	1	1	1
060ECE0070D	CBUQ	6	0	0	0	0	4	1	0	0	1
060ECE0070E	CBUQ	6	0	0	0	0	4	1	0	0	1
060ECE0090E	CBUQ	5	0	0	1	0	5	0	0	1	5
060ECE0110D	CBUQ	13	0	9	0	1	9	1	4	0	0
060ECE0110E	CBUQ	13	0	9	0	1	9	1	4	0	0
060ECE0130D	CBUQ	10	0	2	0	0	13	1	1	0	0
060ECE0130E	CBUQ	10	0	2	0	0	13	1	1	0	0
060ECE0150D	CBUQ	4	0	2	0	0	16	1	2	0	0
060ECE0150E	CBUQ	4	0	2	0	0	16	1	2	0	0
065ECE0010D	CBUQ	12	4	3	0	0	15	4	10	0	0
065ECE0010E	CBUQ	12	4	3	0	0	15	4	10	0	0
065ECE0030D	CBUQ	21	0	0	0	0	13	1	1	0	0
065ECE0030E	CBUQ	9	0	0	0	0	6	1	1	0	0
085ECE0030D	TSD	24	0	16	2	5	45	0	31	4	11
085ECE0030E	TSD	24	0	16	2	5	45	0	31	5	11
085ECE0050D	TSD	4	0	0	0	0	8	1	1	0	0
085ECE0050E	TSD	4	0	0	0	0	8	1	1	0	0
085ECE0070D	TSD	2	0	0	0	0	4	0	1	0	0
085ECE0070E	TSD	2	0	0	0	0	4	0	1	0	0
085ECE0090D	TSD	1	0	0	0	0	3	1	1	0	0
085ECE0090E	TSD	1	0	0	0	0	3	1	1	0	0
090ECE0010D	TSD	18	1	6	0	0	51	2	16	0	1
090ECE0010E	TSD	18	1	6	0	0	51	2	16	0	1

Tabela 6.6 Resumo dos resultados da equação de evolução para o defeito TF em 44 trechos na RMF

Estatística de regressão						
R múltiplo	0,87684773					
R-Quadrado	0,76886184					
R-quadrado ajustado	0,74560608					
Erro padrão	8,1121623					
Observações	44					
ANOVA						
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*		
Regressão	1	9.412,7929	9412,793	143,035962		
Resíduo	43	2.829,7086	65,80718			
Total	44	1.2242,502				
	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	1,5919825	0,1331115	11,95976	2,885E-15	1,323535	1,860428

onde:

gl = grau de liberdade;

SQ = soma dos quadrados;

MQ = média dos quadrados;

F = teste de *Snedecor*;

Stat t = estatística t;

valor-P = valor da probabilidade da estatística t, que neste caso tem que ser menor que 0,025 ou 2,5%;

$F_{0,05,\ 1,\ 43} = 4,06$ ($\mathbf{F_{CRIT}}$).

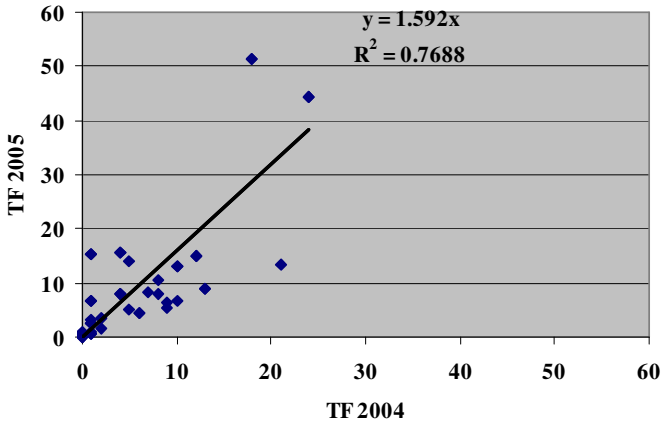


Figura 6.4 Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito TF em 44 trechos da RMF, considerando os três tipos de revestimento

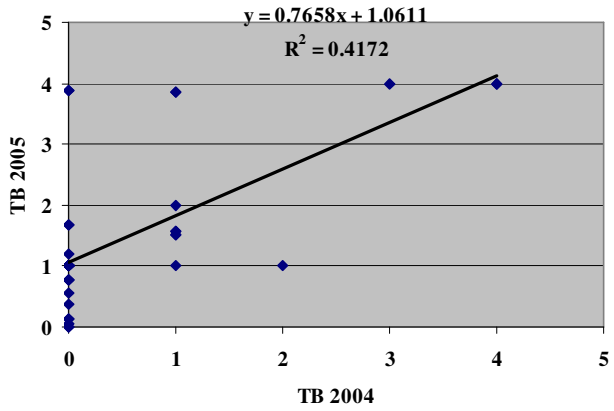


Figura 6.5 Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito TB em 44 trechos da RMF, considerando os três tipos de revestimento

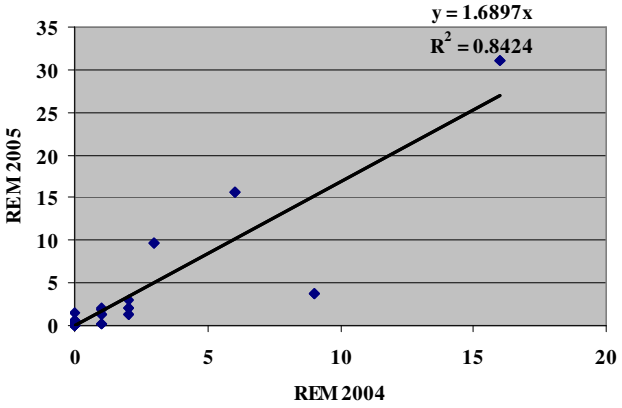


Figura 6.6 Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito REM em 44 trechos da RMF, considerando os três tipos de revestimento

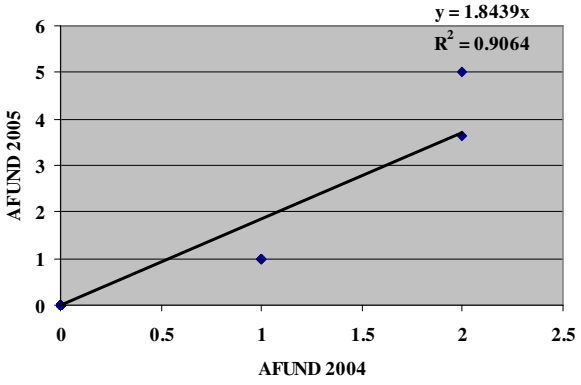


Figura 6.7 Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito AFUND em 44 trechos da RMF, considerando os três tipos de revestimento

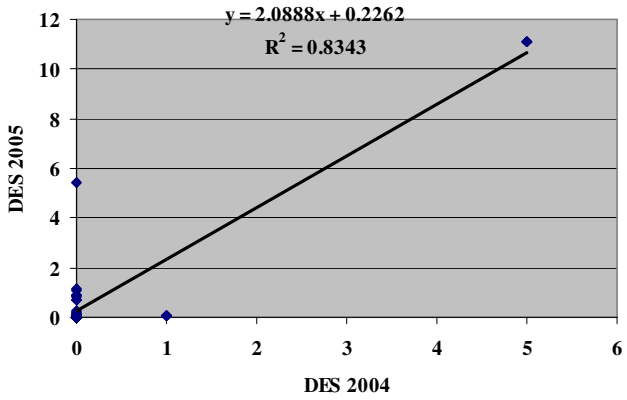


Figura 6.8 Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito DES em 44 trechos da RMF, considerando os três tipos de revestimento

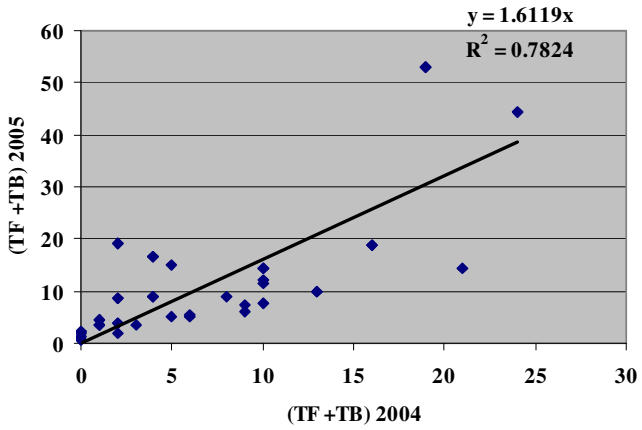


Figura 6.9 Gráfico com a equação de evolução e o R^2 considerando toda a porcentagem da extensão trincada (TF + TB) em 44 trechos da RMF e os três tipos de revestimento

Como se pode notar, na análise estatística das equações de evolução na Tabela 6.7, considerando os três tipos de revestimento, os valores de *F* (teste de *Snedecor*) são sempre maiores do que o $F_{0,05,\ 1,\ 43} = 4{,}06$, valor crítico. Isto implica que a hipótese nula é rejeitada, onde a hipótese nula é que a equação não é significante. Portanto existe uma confiança de 95% de aceitação da significância das equações. Verifica-se também que na análise da equação de evolução considerando toda a porcentagem da extensão trincada (TF + TB), os resultados de F e de R^2 são ainda melhores, do que os obtidos considerando isoladamente TF e TB, podendo assim esta alternativa, já utilizada no SGP do DNIT, também ser usada nos LVCs dos Sistemas de Gestão.

Tabela 6.7 Resultado da análise das equações de evolução dos defeitos/severidades em função do *F* em 44 trechos na RMF

Tipo de Defeito	Modelo	F	F_{CRIT}	Resultado
TF 2004 × TF 2005	y = 1,592 x R^2 = 0,7688	143,03	4,06	Significante
TB 2004 × TB 2005	y = 0,7658 x + 1,0611 R^2 = 0,4172	30,06	4,06	Significante
REM 2004 × REM 2005	y = 1,6897 x R^2 = 0,8424	229,85	4,06	Significante
AFUND 2004 × AFUND 2005	y = 1,8439 x R^2 = 0,9064	416,55	4,06	Significante
DES 2004 × DES 2005	y = 2,0888 x + 0,2262 R^2 = 0,8343	211,43	4,06	Significante
(TF + TB) 2004 × (TF + TB) 2005	y = 1,6119 x R^2 = 0,7824	154,641	4,06	Significante

Uma segunda análise foi efetuada utilizando-se os valores constantes na Tabela 6.5, agrupados por tipo de defeito, comparando os respectivos resultados em 2004 e 2005, sendo então geradas as equações de evolução para cada defeito, considerando por família de revestimento, CBUQ ou TSD. Dos 44 trechos selecionados, 32 têm revestimento em CBUQ, 10 em TSD e apenas dois em AAUQ.

Na Tabela 6.8 são mostrados os resultado da análise das equações de evolução dos defeitos/severidades em função do *F* nos 32 trechos selecionados na RMF com revestimento em CBUQ. Verifica-se que os valores de *F* são sempre maiores do que o $F_{0,05,\ 1,\ 31} = 4,16$, valor crítico. Nas Figuras 6.10 e 6.11 são mostradas as equações, os coeficientes de determinação (R^2) e gráficos para defeitos trinca de fadiga e remendo, respectivamente. Os demais resumos estatísticos estão no Anexo III.

A Tabela 6.9 apresenta os resultados considerando-se os 10 trechos selecionados com revestimento em TSD. Observa-se que também neste caso, os valores *F* são sempre maiores do que o $F_{0,05,\ 1,\ 9} = 5,12$, valor crítico. Nas Figuras 6.12 e 6.13 são mostradas as equações, os coeficientes de determinação (R^2) e gráficos para defeitos trinca de fadiga e remendo. Os demais resumos estatísticos estão no Anexo III.

Tabela 6.8 Resultado da análise das equações de evolução dos defeitos/severidades em função do *F* em 32 trechos selecionados na RMF, com revestimento em CBUQ.

Tipo de Defeito	Modelo	F	F_{CRIT}	Resultado
TF 2004 × TF 2005	y = 1,0679 x R^2 = 0,7552	92,58	4,16	Significante
TB 2004 × TB 2005	y = 0,6682 x + 1,1353 R^2 = 0,4435	23,90	4,16	Significante
REM 2004 × REM 2005	y = 1,9914 x R^2 = 0,7491	86,60	4,16	Significante
AFUND 2004 × AFUND 2005	y = 1,40 x R^2 = 0,8733	253,16	4,16	Significante
DES 2004 × DES 2005	y = 2,5248 x R^2 = 0,4720	20,56	4,16	Significante
(TF + TB) 2004 × (TF + TB) 2005	y = 1,1702 x R^2 = 0,7939	111,76	4,16	Significante

Tabela 6.9 Resultado da análise das equações de evolução dos defeitos/severidades em função do *F* em 10 trechos selecionados na RMF, com revestimento em TSD.

Tipo de Defeito	Modelo	F	F_{CRIT}	Resultado
TF 2004 × TF 2005	y = 2,211 x R^2 = 0,9552	192,00	5,12	Significante
TB 2004 × TB 2005	y = 1,0257 x + 0,5314 R^2 = 0,4871	7,60	5,12	Significante
REM 2004 × REM 2005	y = 2,0261 x R^2 = 0,9887	729,13	5,12	Significante
AFUND 2004 × AFUND 2005	y = 2,1603 x R^2 = 0,9700	364,02	5,12	Significante
DES 2004 × DES 2005	y = 2,1726 x + 0,2562 R^2 = 0,9941	1.349,88	5,12	Significante
(TF + TB) 2004 × (TF + TB) 2005	y = 2,2157 x R^2 = 0,9597	214,65	5,12	Significante

Percebe-se na análise dos resultados das Tabelas 6.8 e 6.9, que as equações de evolução dos defeitos/severidades são melhores correlacionadas nos trechos com revestimento em TSD do que nos trechos em CBUQ. Apenas a equação de evolução da TB apresentou um menor valor do R^2 em relação aos demais, nesta última análise, Tabela 6.9. Porém, os resultados das Tabelas 6.7 e 6.8 também mostram uma baixa correlação na equação

de evolução da TB, fortalecendo assim a sugestão de utilizar nos LVCs toda a porcentagem da extensão trincada (TF + TB), ao invés de TF e TB, isoladamente.

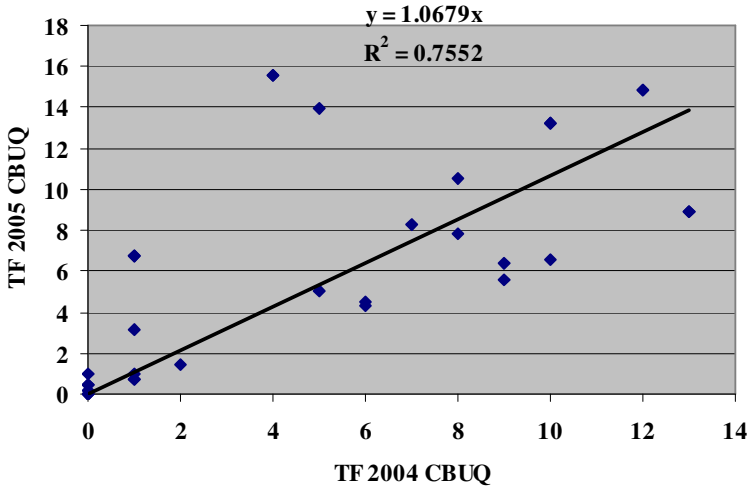


Figura 6.10 Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito TF em 32 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

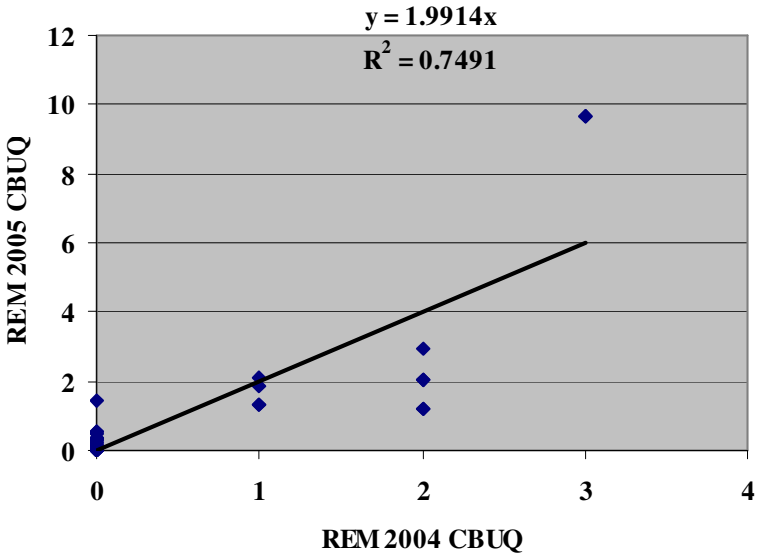


Figura 6.11 Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito REM em 32 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

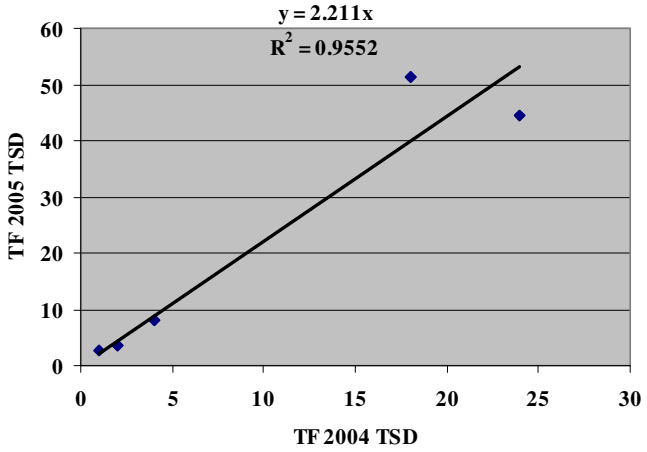


Figura 6.12 Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito TF em 10 trechos da RMF com revestimento em TSD

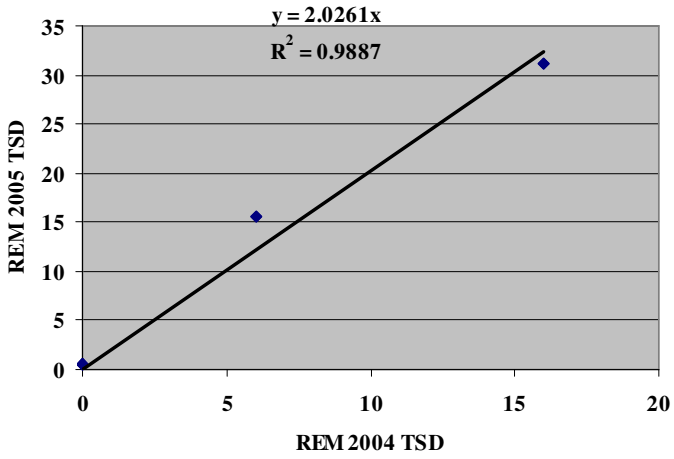


Figura 6.13 Gráfico com a equação de evolução e o R^2 para o defeito REM em 10 trechos da RMF com revestimento em TSD

6.3.2 Modelos de correlação entre os valores do IRI medidos com o perfilômetro a laser

No Capítulo anterior foram mostrados os resultados das medidas de irregularidade longitudinal, efetuadas com o perfilômetro a laser para as disposições dos sensores na posição normal (SPN), no lado direito (SLD) e no lado esquerdo (SLE), Tabelas 5.23, 5.25 e 5.27, respectivamente, além de algumas considerações iniciais. Esta pesquisa tem como um dos seus principais objetivos, comparar e analisar os valores das medidas obtidas com os sensores situados nas trilhas interna e externa da faixa de rolamento,

conforme disposições destes sensores apresentadas na Figura 6.14, através de modelos estatísticos que correlacionem essas medidas.

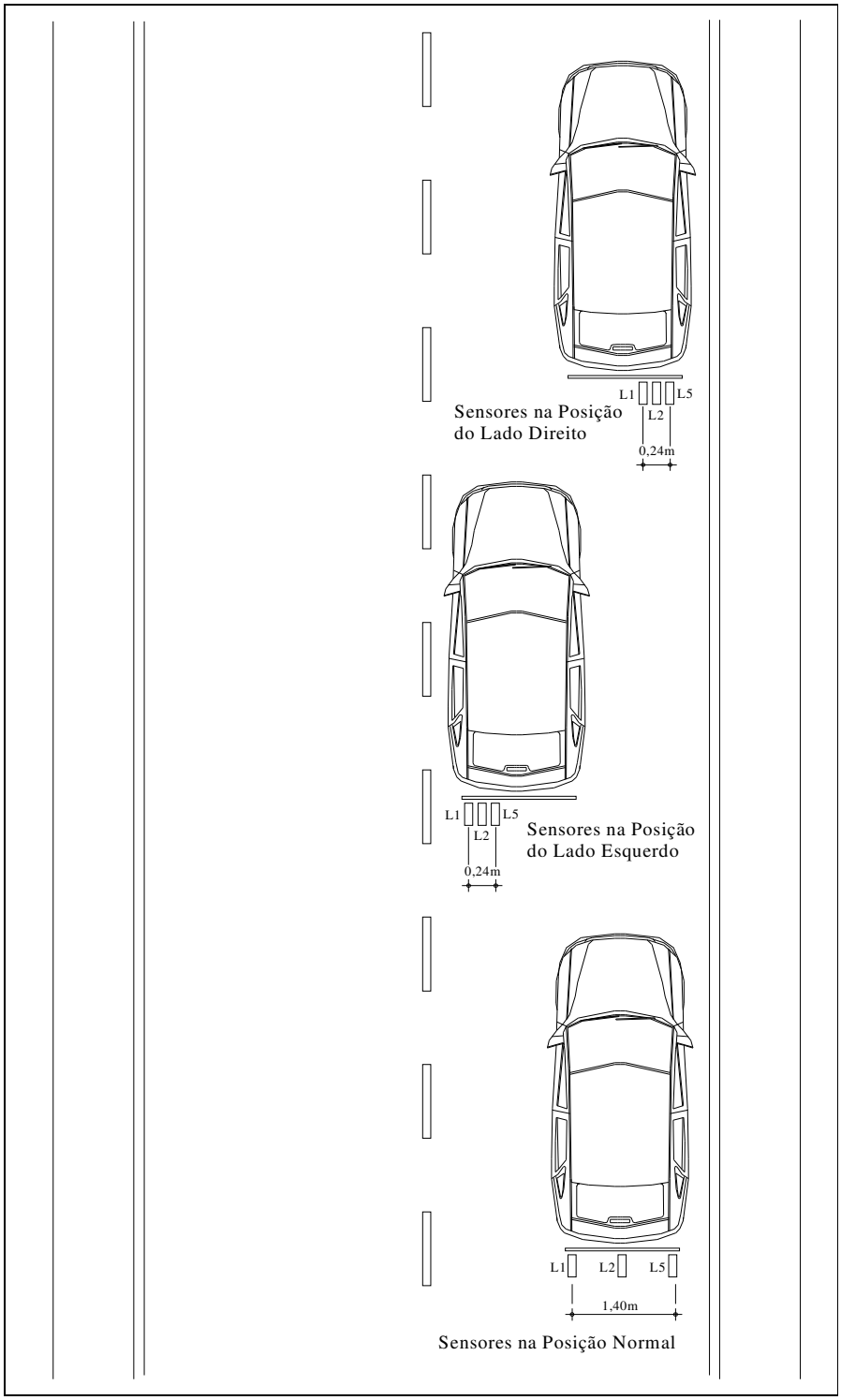


Figura 6.14 Disposições dos sensores nos levantamentos efetuados para a medição do IRI nesta pesquisa

Modelos correlacionando o resultado do IRI nas trilhas interna e externa, com a localização dos sensores na posição normal

Foram gerados dois modelos para a localização dos sensores na posição normal (SPN). O primeiro considerando os resultados do $IRI_{ext} \times IRI_{int}$ da Tabela 5.23 para os 72 trechos escolhidos e o segundo utilizando os dados do $IRI_{ext} \times IRI_{int}$ da Tabela 5.29 para 42 trechos, sendo IRI_{ext}, o IRI na trilha externa e o IRI_{int} representa o IRI na trilha interna.

Na análise estatística da equação de regressão e planilhas de cálculo mostradas na Tabela 6.10 para o primeiro modelo com 72 trechos com SPN, verifica-se que o valor de *F*, 645,13 é maior do que $F_{0,05,\ 1,\ 70} = 3,84$, valor crítico, e que o *valor-P* da estatística t é inferior a 2,5%. Portanto, o modelo é significante.

A mesma análise foi feita para o segundo modelo, observando-se que *F* = 282,67 é maior que $F_{0,05,\ 1,\ 40} = 4,08$, assim como *valor-P* da estatística t é inferior a 2,5%, portanto o modelo também é significante. Os resumos estatísticos deste modelo estão no Anexo III.

A Figura 6.15 apresenta o gráfico com a equação de regressão e o R^2 do modelo para os 72 trechos, enquanto que na Figura 6.16 é mostrada a equação e o R^2 para o modelo com 42 trechos, ambos com SPN.

Tabela 6.10. Resumo dos resultados do modelo $IRI_{int} \times IRI_{ext}$ para SPN nos 72 trechos

Estatística de regressão						
R múltiplo	0,949797805					
R-Quadrado	0,90211587					
R-quadrado ajustado	0,900717526					
Erro padrão	0,287450225					
Observações	72					
ANOVA						
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*		
Regressão	1	53,30566738	53,3056674	645,131		
Resíduo	70	5,78393422	0,08262763			
Total	71	59,0896016				
	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0,412224407	0,107812325	3,82353695	0,00028	0,1972	0,627249
Variável X 1	0,81239461	0,031984752	25,3994341	4,7E-37	0,748603	0,876186

Verifica-se na análise destes modelos, que à medida que o IRI vai aumentando, se torna maior a diferença de valores entre as trilhas, preponderando os maiores valores na trilha externa ou do lado direito da pista. Esta assertiva concorda com resultados encontrados na literatura por outros pesquisadores, dentre eles KSAIBATI et. al, (1998), citado no capítulo 2.

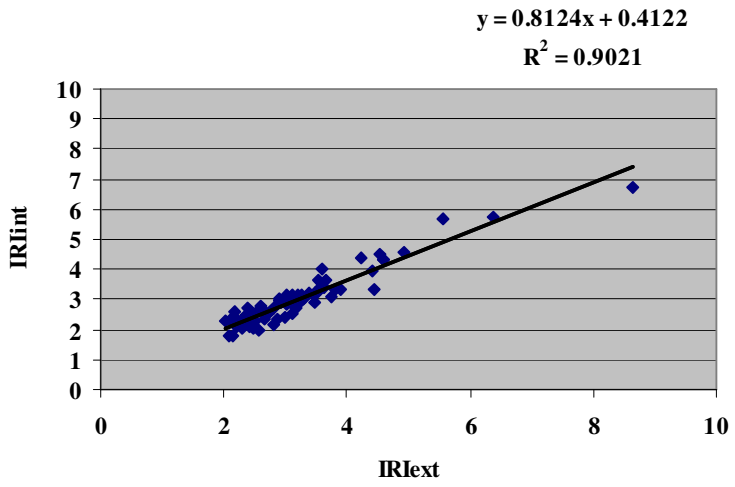


Figura 6.15 Gráfico e equação do modelo $IRI_{int} \times IRI_{ext}$ para SPN nos 72 trechos da RMF

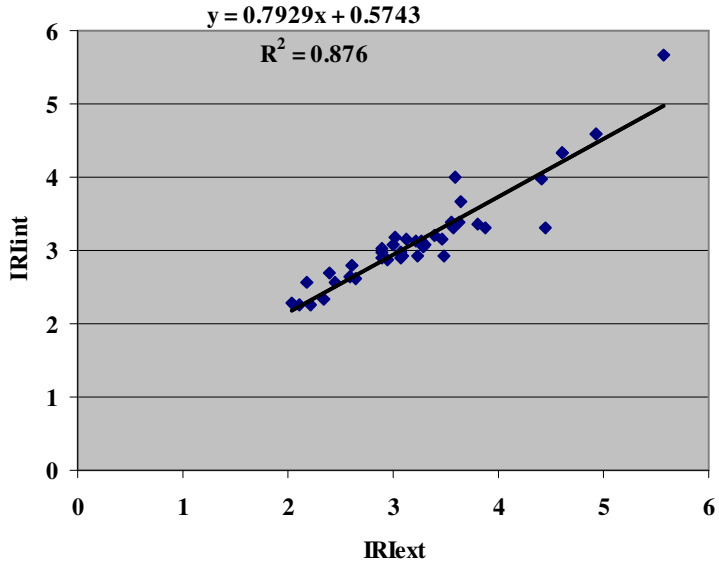


Figura 6.16 Gráfico e equação do modelo $IRI_{int} \times IRI_{ext}$ para SPN em 42 trechos desta pesquisa

Modelo correlacionando os resultados do IRI médio, com a localização dos três sensores no lado direito (LD) e no lado esquerdo (LE)

Foram utilizados neste modelo os valores do IRI médio da Tabela 5.25, com os três sensores no lado direito e da Tabela 5.27 com os três sensores no lado esquerdo, nos 42 trechos selecionados da RMF.

Na análise estatística do modelo, observa-se que o teste de *Snedecor* é atendido, o valor de F = 498,48 é maior que $F_{0,05,\ 1,\ 40}$ = 4,08, assim como *valor-P* da estatística t é inferior a 2,5%. Os resumos estatísticos deste modelo estão no Anexo III.

A Figura 6.17 apresenta o gráfico com a equação de regressão e com o R^2 do modelo para os 42 trechos da RMF.

Verifica-se, na análise deste modelo, a mesma tendência observada nos modelos anteriores, ou seja, preponderam os maiores valores do IRI médio para a disposição dos três sensores no lado direito, quando estes valores vão aumentando.

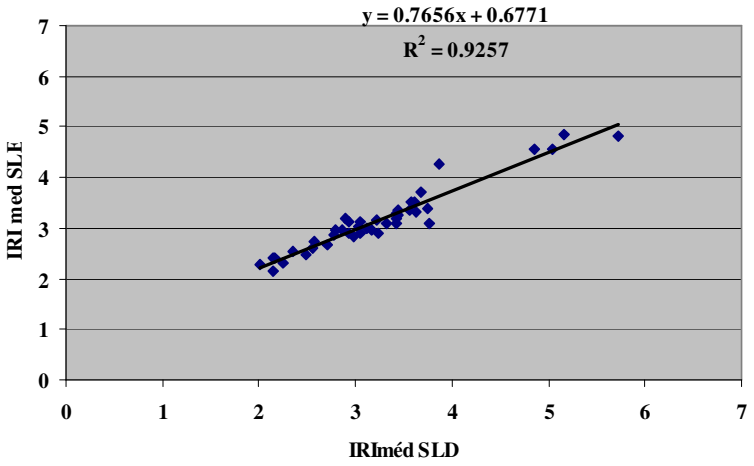


Figura 6.17 Gráfico, equação e R^2 do modelo $IRI_{médio}$ SLD × $IRI_{médio}$ SLE em 42 trechos desta pesquisa

Modelo de correlação IRI_{int} com os sensores na posição normal e IRI_{int} com os sensores no lado esquerdo

Neste modelo foram utilizados os resultados do IRI_{int} da Tabela 5.29 para os sensores dispostos na posição normal e no lado esquerdo, conforme mostrado na Figura 6.14. Verifica-se nos resultados estatísticos que são atendidos os critérios analisados nos modelos anteriores, F = 347,29 é maior que $F_{0,05,\ 1,\ 40}$ = 4,08, assim como o *valor-P* da estatística t é inferior a 2,5%. Os resumos estatísticos deste modelo estão no Anexo III.

Observa-se uma forte correlação entre os valores do IRI_{int} para as citadas disposições dos sensores, ao analisarmos a equação, o gráfico e o coeficiente de determinação R^2 do modelo, mostrados na Figura 6.18. Constata-se que para as medições do IRI_{int} não houve influência da utilização da haste de 1,40 m, assim como do espaçamento entre os sensores, confirmando o que foi citado no Capítulo 5.

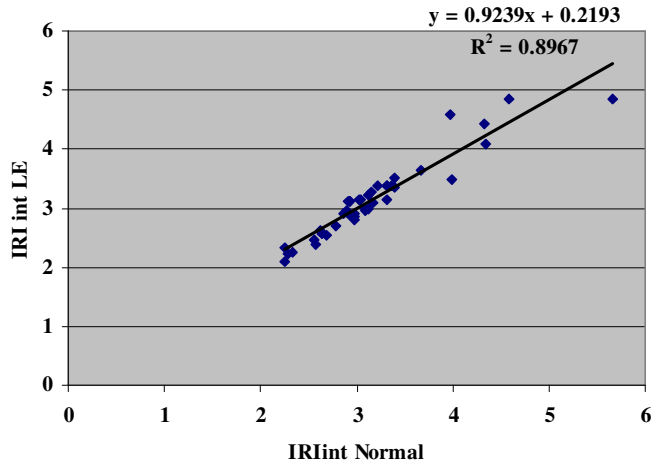


Figura 6.18 Gráfico, equação e R^2 do modelo IRI_{int} SPN × IRI_{int} SLE em 42 trechos desta pesquisa

Verifica-se na análise estatística dos quatro modelos de correlação entre os valores do IRI medidos com o perfilômetro a laser na Tabela 6.11, que os valores de *F* (teste de *Snedecor*) são sempre maiores do que o *F* crítico. Portanto, rejeita-se a hipótese nula e existe uma confiança de 95% de aceitação da significância dos modelos.

Tabela 6.11 Resultado da análise dos modelos de correlação entre os valores do IRI medidos com o perfilômetro a laser em função do *F*

Valores de IRI comparados	Modelo	F	F_{CRIT}	Resultado
(IRI_I ×IRI_E) SPN 72 trechos.	y = 0,8124 x + 0,4122 R^2 = 0,9021	645,13	3,84	Significante
(IRI_I × IRI_E) SPN 42 trechos.	y = 0,7929 x + 0,5743 R^2 = 0,876	282,67	4,08	Significante
$IRI_{médio}$ (SLD × SLE) 42 trechos.	y = 0,7656 x + 0,6771 R^2 = 0,9257	498,48	4,08	Significante
IRI_{int} (SPN × SLE) 42 trechos.	y = 0,9239 x + 0,2193 R^2 = 0,8967	347,29	4,08	Significante

6.3.3 Modelos correlacionando os valores do IRI, com o ICP, com os defeitos do LVC, com a deflexão e com o número estrutural corrigido

Modelos correlacionando o IRI com o ICP

Entre estes dois parâmetros foram gerados quatro modelos de regressão. Em todos foi aplicado aos valores do IRI médio, 95% de confiabilidade. O primeiro modelo considerando os dados da Tabela 6.12, para os 72 trechos da RMF com os sensores na posição normal. No segundo e no terceiro modelo foram utilizados os resultados das Tabelas 6.13 e 6.14, para 42 trechos com a disposição dos sensores nos lados direito e esquerdo, respectivamente. No quarto modelo foram utilizados os valores do IRI médio da Tabela 5.29, que é a média dos oito resultados de IRI para as posições dos sensores SPN, SLD e SLE, também nos 42 trechos da RMF. Os valores usados neste quarto modelo estão na Tabela 6.15.

No critério de confiabilidade foi utilizado o intervalo de confiança de 95%. O IRI médio com confiabilidade de 95% ($IRI_{médioconf}$) é calculado pela equação 6.1:

$$IRI_{médioconf} = IRI_{médio} + 1{,}64\ \sigma \qquad (6.1)$$

Verifica-se que foram atendidos os critérios para o teste *F* e para o *valor-P* da estatística t nestes modelos e seus respectivos resumos estatísticos estão no Anexo III.

Na avaliação dos quatro modelos, constata-se que há uma forte correlação entre os valores do $IRI_{médioconf}$ e a variável explicativa, o ICP P(o), chegando, no quarto modelo a ter um coeficiente de correlação (R) de 0,9701 e, consequentemente, poder de explicação (R^2) de 0,9410.

Ao analisarmos as equações, os gráficos e os coeficientes de determinação R^2, mostrados na Figuras 6.19, para o primeiro modelo e nas Figuras 6.20, 6.21 e 6.22 para o segundo, o terceiro e o quarto modelo, respectivamente, observa-se que a forte correlação entre o ICP P(o) e o IRI, independe que os sensores estejam dispostos na posição normal, no lado esquerdo ou no lado direito.

Também pode ser observado na análise do gráfico da Figura 6.19, que a utilização dos valores do IRI e do ICP do trecho 065ECE0010E, considerados nos programas de estatística como valores extremos da amostra, conforme citado no Capítulo 5, influenciaram na determinação do modelo. Caso este trecho não fosse considerado a

equação passaria a ser y = - 0,1109 x + 11,488, com R^2 = 0,8608, com acréscimo, portanto, no coeficiente de determinação.

Verifica-se na análise estatística dos quatro modelos de correlação entre os valores do $IRI_{médioconf}$ e o ICP P(o), na Tabela 6.16, que os valores de *F* (teste de *Snedecor*) são sempre maiores do que o *F* crítico. Portanto, os modelos são significantes.

Tabela 6.12 Resultados do IRI médio com 95% de confiabilidade com os sensores na posição normal e do ICP(Po) nos 72 trechos da RMF

Trecho	IRIint	IRIext	IRImédio	Desvio Padrão (σ)	IRImédio conf. 95%	ICP (Po)
01-025ECE0010D	3,66	3,53	3,60	0,09	3,75	73,00
02-025ECE0010E	3,11	3,74	3,42	0,44	4,15	74,00
03-025ECE0030D	4,50	4,54	4,52	0,03	4,57	68,00
04-025ECE0030E	4,37	4,22	4,30	0,11	4,47	68,00
05-025ECE0050D	2,52	3,10	2,81	0,41	3,48	86,00
06-025ECE0050E	2,54	2,73	2,63	0,14	2,86	86,50
07-040ECE0010D	3,19	3,46	3,33	0,19	3,64	80,50
08-040ECE0010E	2,83	3,03	2,93	0,14	3,16	83,00
09-040ECE0030D	2,70	3,17	2,93	0,33	3,48	86,50
10-040ECE0030E	2,37	2,86	2,62	0,35	3,19	80,00
11-040ECE0050D	1,99	2,56	2,28	0,40	2,93	92,00
12-040ECE0050E	2,03	2,47	2,25	0,32	2,77	92,00
13-040ECE0070D	1,79	2,16	1,98	0,26	2,40	93,00
14-040ECE0070E	1,77	2,08	1,93	0,22	2,29	93,00
15-040ECE0090D	2,19	2,81	2,50	0,44	3,21	87,00
16-040ECE0090E	2,08	2,30	2,19	0,15	2,44	87,00
17-040ECE0110D	2,41	3,00	2,71	0,42	3,39	84,00
18-040ECE0110E	2,71	2,80	2,75	0,07	2,86	80,00
19-040ECE0130D	2,09	2,42	2,26	0,23	2,64	91,50
20-040ECE0130E	2,34	2,20	2,27	0,10	2,43	91,50
21-040ECE0150D	2,30	2,51	2,41	0,15	2,65	91,50
22-040ECE0150E	2,24	2,28	2,26	0,02	2,30	91,50
23-040ECE0170D	2,46	2,35	2,41	0,08	2,54	86,50
24-040ECE0170E	2,40	2,15	2,27	0,18	2,57	91,50
25-060ECE0010D	3,40	3,63	3,51	0,17	3,79	77,00
26-060ECE0010E	3,09	3,01	3,05	0,06	3,14	81,00
27-060ECE0030D	3,99	3,59	3,79	0,29	4,26	76,00
28-060ECE0030E	2,91	3,08	2,99	0,12	3,19	80,00
29-060ECE0050D	3,17	3,02	3,10	0,10	3,27	81,50
30-060ECE0050E	3,02	2,89	2,96	0,09	3,10	81,50
31-060ECE0070D	2,89	2,89	2,89	0,00	2,90	83,50
32-060ECE0070E	2,62	2,65	2,63	0,02	2,67	83,50
33-060ECE0090D	3,09	3,31	3,20	0,16	3,45	81,00

Tabela 6.12 Resultados do IRI médio com 95% de confiabilidade com os sensores na posição normal e do ICP(Po) nos 72 trechos da RMF

Trecho	IRIint	IRIext	IRImédio	Desvio Padrão (σ)	IRImédio conf. 95%	ICP (Po)
34-060ECE0090E	2,92	3,08	3,00	0,11	3,19	81,00
35-060ECE0110D	2,97	2,89	2,93	0,06	3,02	82,00
36-060ECE0110E	2,92	3,23	3,08	0,21	3,43	82,00
37-060ECE0130D	2,57	2,17	2,37	0,28	2,83	84,00
38-060ECE0130E	2,64	2,58	2,61	0,04	2,69	84,00
39-060ECE0150D	2,78	2,60	2,69	0,13	2,90	82,00
40-060ECE0150E	2,98	3,07	3,03	0,07	3,13	82,00
41-065ECE0010D	5,77	6,36	6,07	0,42	6,75	57,00
42-065ECE0010E	6,72	8,63	7,67	1,35	9,89	47,00
43-065ECE0030D	2,33	2,67	2,50	0,24	2,89	85,00
44-065ECE0030E	2,03	2,30	2,17	0,20	2,49	87,50
45-065ECE0050D	2,19	2,25	2,22	0,04	2,29	87,50
46-065ECE0050E	2,07	2,20	2,13	0,09	2,29	87,50
47-085ECE0030D	4,59	4,92	4,76	0,23	5,14	63,50
48-085ECE0030E	5,66	5,57	5,61	0,07	5,73	57,00
49-085ECE0050D	3,67	3,64	3,65	0,01	3,68	72,50
50-085ECE0050E	3,97	4,41	4,19	0,31	4,71	65,00
51-085ECE0070D	3,31	3,57	3,44	0,18	3,74	76,00
52-085ECE0070E	3,36	3,80	3,58	0,31	4,09	76,00
53-085ECE0090D	3,16	3,46	3,31	0,22	3,66	76,00
54-085ECE0090E	3,32	3,88	3,60	0,40	4,26	72,00
55-085ECE0110D	3,21	3,39	3,30	0,13	3,51	76,00
56-085ECE0110E	3,39	3,56	3,47	0,12	3,68	76,00
57-085ECE0130D	3,12	3,21	3,17	0,06	3,27	80,00
58-085ECE0130E	2,92	3,48	3,20	0,40	3,86	75,00
59-085ECE0150D	3,04	3,29	3,17	0,18	3,46	80,00
60-085ECE0150E	3,31	4,44	3,88	0,80	5,19	68,00
61-085ECE0170D	2,98	3,07	3,03	0,06	3,13	80,00
62-085ECE0170E	3,12	3,26	3,19	0,10	3,36	80,00
63-090ECE0010D	4,32	4,61	4,46	0,20	4,80	68,00
64-090ECE0010E	4,32	4,61	4,46	0,20	4,80	70,00
65-341ECE0010D	3,15	3,12	3,14	0,02	3,18	82,00
66-341ECE0010E	2,87	2,94	2,91	0,04	2,98	82,00
67-341ECE0030D	2,25	2,11	2,18	0,10	2,34	85,00
68-341ECE0030E	2,34	2,35	2,35	0,00	2,35	85,00
69-341ECE0050D	2,28	2,03	2,16	0,18	2,45	89,00
70-341ECE0050E	2,26	2,22	2,24	0,03	2,29	89,00
71-341ECE0070D	2,55	2,45	2,50	0,07	2,62	85,00
72-341ECE0070E	2,69	2,39	2,54	0,21	2,89	85,00

Tabela 6.13 Resultados do IRImédio com 95% de confiabilidade com os sensores no LD e do ICP (Po) em 42 trechos desta pesquisa

Trecho	IRIint	IRIcent.	IRIext.	IRImédio	Desvio Padrão (σ)	IRImédio conf. 95%.	ICP (Po)
25-060ECE0010D	3,52	3,57	3,65	3,58	0,06	3,69	77,00
26-060ECE0010E	2,75	2,79	2,83	2,79	0,04	2,85	81,00
27-060ECE0030D	3,43	3,60	3,82	3,62	0,19	3,94	76,00
28-060ECE0030E	2,89	3,08	3,21	3,06	0,16	3,32	80,00
29-060ECE0050D	2,87	2,92	2,98	2,93	0,06	3,02	81,50
30-060ECE0050E	2,84	2,89	2,95	2,89	0,05	2,98	81,50
31-060ECE0070D	2,86	2,86	2,87	2,86	0,01	2,88	83,50
32-060ECE0070E	2,68	2,71	2,74	2,71	0,03	2,76	83,50
33-060ECE0090D	3,02	3,10	3,22	3,11	0,10	3,28	81,00
34-060ECE0090E	3,18	3,22	3,27	3,22	0,05	3,29	81,00
35-060ECE0110D	2,64	2,78	2,93	2,78	0,14	3,02	82,00
36-060ECE0110E	3,10	3,24	3,38	3,24	0,14	3,47	82,00
37-060ECE0130D	2,09	2,15	2,25	2,16	0,08	2,30	84,00
38-060ECE0130E	2,43	2,56	2,67	2,55	0,12	2,74	84,00
39-060ECE0150D	2,44	2,59	2,70	2,58	0,13	2,79	82,00
40-060ECE0150E	2,78	2,97	3,19	2,98	0,20	3,32	82,00
47-085ECE0030D	4,92	5,22	5,33	5,16	0,21	5,51	63,50
48-085ECE0030E	5,40	5,81	5,95	5,72	0,29	6,19	57,00
49-085ECE0050D	3,59	3,65	3,78	3,67	0,10	3,84	72,50
50-085ECE0050E	4,89	5,02	5,23	5,05	0,17	5,33	65,00
51-085ECE0070D	3,45	3,56	3,67	3,56	0,11	3,74	76,00
52-085ECE0070E	3,66	3,75	3,83	3,75	0,09	3,89	76,00
53-085ECE0090D	3,39	3,41	3,52	3,44	0,07	3,55	76,00
54-085ECE0090E	3,36	3,41	3,49	3,42	0,07	3,53	72,00
55-085ECE0110D	3,60	3,63	3,66	3,63	0,03	3,68	76,00
56-085ECE0110E	3,42	3,43	3,50	3,45	0,05	3,52	76,00
57-085ECE0130D	3,48	3,40	3,38	3,42	0,05	3,50	80,00
58-085ECE0130E	3,32	3,32	3,32	3,32	0,00	3,32	75,00
59-085ECE0150D	3,40	3,40	3,50	3,43	0,06	3,53	80,00
60-085ECE0150E	3,69	3,74	3,84	3,76	0,08	3,88	68,00
61-085ECE0170D	3,02	3,02	3,08	3,04	0,03	3,10	80,00
62-085ECE0170E	3,13	3,18	3,22	3,17	0,05	3,25	80,00
63-090ECE0010D	4,59	4,87	5,08	4,85	0,24	5,25	68,00
64-090ECE0010E	3,78	3,87	3,97	3,87	0,09	4,02	70,00
65-341ECE0010D	2,97	3,02	3,10	3,03	0,07	3,14	82,00
66-341ECE0010E	2,86	2,94	3,01	2,94	0,08	3,06	82,00
67-341ECE0030D	2,05	2,15	2,25	2,15	0,10	2,32	85,00
68-341ECE0030E	2,20	2,24	2,29	2,25	0,05	2,32	85,00
69-341ECE0050D	1,93	2,00	2,08	2,00	0,08	2,13	89,00
70-341ECE0050E	2,06	2,13	2,23	2,14	0,08	2,28	89,00
71-341ECE0070D	2,43	2,46	2,56	2,48	0,07	2,59	85,00
72-341ECE0070E	3,52	3,57	3,65	3,58	0,06	3,69	77,00

Tabela 6.14 Resultados do IRImédio com 95% de confiabilidade com os sensores no LE e do ICP (Po) em 42 trechos desta pesquisa

Trecho	IRIint	IRIcen.	IRIext.	IRImédio	Desvio Padrão (σ)	IRImédio conf. 95%.	ICP (Po)
25-060ECE0010D	3,51	3,49	3,51	3,50	0,01	3,52	77,00
26-060ECE0010E	3,00	2,96	2,95	2,97	0,02	3,01	81,00
27-060ECE0030D	3,60	3,49	3,49	3,53	0,06	3,63	76,00
28-060ECE0030E	3,09	3,11	3,13	3,11	0,02	3,14	80,00
29-060ECE0050D	3,13	3,12	3,10	3,12	0,02	3,14	81,50
30-060ECE0050E	3,32	3,08	3,14	3,18	0,12	3,38	81,50
31-060ECE0070D	2,96	2,94	2,95	2,95	0,01	2,97	83,50
32-060ECE0070E	2,74	2,62	2,63	2,66	0,07	2,78	83,50
33-060ECE0090D	3,01	2,97	2,98	2,99	0,02	3,02	81,00
34-060ECE0090E	3,35	3,06	3,11	3,17	0,15	3,43	81,00
35-060ECE0110D	2,90	2,84	2,86	2,87	0,03	2,92	82,00
36-060ECE0110E	2,95	2,89	2,87	2,90	0,04	2,97	82,00
37-060ECE0130D	2,46	2,41	2,38	2,42	0,04	2,49	84,00
38-060ECE0130E	2,65	2,60	2,58	2,61	0,04	2,66	84,00
39-060ECE0150D	2,77	2,72	2,70	2,73	0,03	2,78	82,00
40-060ECE0150E	2,88	2,83	2,81	2,84	0,04	2,90	82,00
47-085ECE0030D	4,83	4,86	4,85	4,84	0,01	4,87	63,50
48-085ECE0030E	4,82	4,77	4,84	4,81	0,03	4,86	57,00
49-085ECE0050D	3,76	3,73	3,65	3,71	0,06	3,81	72,50
50-085ECE0050E	4,58	4,56	4,58	4,57	0,01	4,59	65,00
51-085ECE0070D	3,33	3,34	3,37	3,35	0,02	3,38	76,00
52-085ECE0070E	3,37	3,36	3,39	3,37	0,02	3,40	76,00
53-085ECE0090D	3,23	3,24	3,27	3,25	0,02	3,28	76,00
54-085ECE0090E	3,22	3,26	3,37	3,28	0,08	3,41	72,00
55-085ECE0110D	3,25	3,30	3,38	3,31	0,07	3,42	76,00
56-085ECE0110E	3,36	3,38	3,36	3,37	0,01	3,39	76,00
57-085ECE0130D	3,15	3,19	3,22	3,19	0,03	3,24	80,00
58-085ECE0130E	3,05	3,07	3,12	3,08	0,03	3,13	75,00
59-085ECE0150D	3,06	3,12	3,14	3,10	0,04	3,17	80,00
60-085ECE0150E	3,06	3,12	3,14	3,10	0,04	3,17	68,00
61-085ECE0170D	2,85	2,88	2,92	2,89	0,03	2,94	80,00
62-085ECE0170E	2,97	2,96	2,99	2,98	0,01	3,00	80,00
63-090ECE0010D	4,67	4,56	4,42	4,55	0,12	4,76	68,00
64-090ECE0010E	4,40	4,25	4,10	4,25	0,15	4,50	70,00
65-341ECE0010D	2,98	3,04	3,08	3,03	0,05	3,11	82,00
66-341ECE0010E	2,85	2,88	2,92	2,88	0,04	2,94	82,00
67-341ECE0030D	2,49	2,43	2,33	2,42	0,08	2,55	85,00
68-341ECE0030E	2,33	2,32	2,26	2,30	0,04	2,37	85,00
69-341ECE0050D	2,32	2,27	2,22	2,27	0,05	2,36	89,00
70-341ECE0050E	2,20	2,17	2,10	2,16	0,05	2,24	89,00
71-341ECE0070D	2,47	2,48	2,47	2,47	0,01	2,48	85,00
72-341ECE0070E	2,57	2,54	2,54	2,55	0,02	2,58	85,00

Tabela 6.15 Resultados da média do IRI para três posições dos sensores com 95% de confiabilidade e do ICP (Po) em 42 trechos desta pesquisa

Trecho	IRImédio	Desvio Padrão	IRImédio conf. 95%.	ICP (Po)
25-060ECE0010D	3,54	0,080	3,67	77,00
26-060ECE0010E	2,88	0,103	3,12	81,00
27-060ECE0030D	3,57	0,139	3,94	76,00
28-060ECE0030E	3,09	0,106	3,24	80,00
29-060ECE0050D	3,02	0,112	3,22	81,50
30-060ECE0050E	3,04	0,179	3,28	81,50
31-060ECE0070D	2,90	0,041	2,97	83,50
32-060ECE0070E	2,67	0,051	2,76	83,50
33-060ECE0090D	3,09	0,121	3,29	81,00
34-060ECE0090E	3,20	0,106	3,37	81,00
35-060ECE0110D	2,85	0,103	3,02	82,00
36-060ECE0110E	3,07	0,193	3,39	82,00
37-060ECE0130D	2,31	0,170	2,59	84,00
38-060ECE0130E	2,59	0,075	2,71	84,00
39-060ECE0150D	2,66	0,113	2,85	82,00
40-060ECE0150E	2,94	0,141	3,17	82,00
47-085ECE0030D	5,00	0,217	5,32	63,50
48-085ECE0030E	5,27	0,531	6,14	57,00
49-085ECE0050D	3,69	0,074	3,79	72,50
50-085ECE0050E	4,81	0,281	5,30	65,00
51-085ECE0070D	3,45	0,137	3,67	76,00
52-085ECE0070E	3,56	0,212	3,92	76,00
53-085ECE0090D	3,34	0,127	3,54	76,00
54-085ECE0090E	3,35	0,099	3,75	72,00
55-085ECE0110D	3,47	0,181	3,72	76,00
56-085ECE0110E	3,41	0,054	3,54	76,00
57-085ECE0130D	3,30	0,134	3,49	80,00
58-085ECE0130E	3,20	0,133	3,51	75,00
59-085ECE0150D	3,27	0,184	3,53	80,00
60-085ECE0150E	3,43	0,360	4,32	68,00
61-085ECE0170D	2,96	0,091	3,12	80,00
62-085ECE0170E	3,08	0,115	3,30	80,00
63-090ECE0010D	4,70	0,238	5,04	68,00
64-090ECE0010E	4,06	0,235	4,46	70,00
65-341ECE0010D	3,06	0,066	3,17	82,00
66-341ECE0010E	2,91	0,054	3,00	82,00
67-341ECE0030D	2,28	0,167	2,51	85,00
68-341ECE0030E	2,29	0,054	2,38	85,00
69-341ECE0050D	2,14	0,149	2,39	89,00
70-341ECE0050E	2,17	0,069	2,29	89,00
71-341ECE0070D	2,48	0,047	2,56	85,00
72-341ECE0070E	2,47	0,133	2,69	85,00

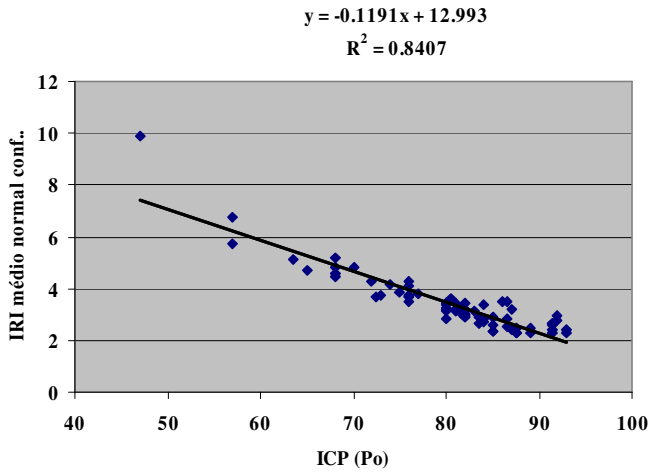


Figura 6.19 Gráfico, equação e R^2 do modelo ICP P(o) x $IRI_{médioconf}$ SPN nos 72 trechos da RMF

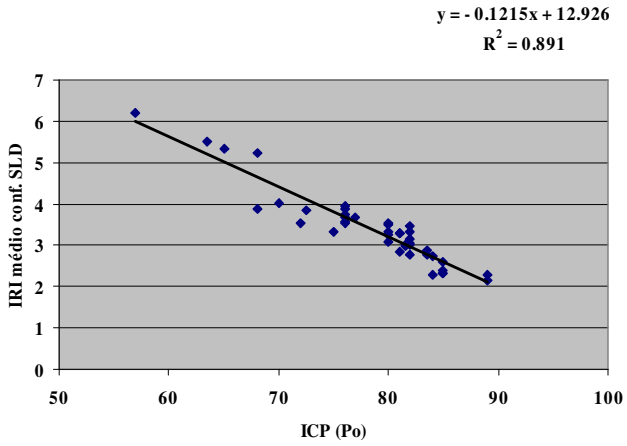


Figura 6.20 Gráfico, equação e R^2 do modelo ICP P(o) x $IRI_{médioconf}$ SLD nos 42 trechos da RMF

Tabela 6.16 Resultado da análise dos modelos de correlação entre os valores do ICP P(o) e o IRI médio conf. 95% em função do *F*

Valores comparados	Modelo	F	F_{CRIT}	Resultado
$IRI_{médioconf}$ × ICP P(o) SPN 72 trechos	y = - 0,1191x + 12,993 R^2 = 0,8407	369,384	3,84	Significante
$IRI_{médioconf}$ × ICP P(o) SLD 42 trechos	y = - 0,1215x + 12,926 R^2 = 0,891	327,019	4,08	Significante
$IRI_{médioconf}$ × ICP P(o) SLE 42 trechos	y = - 0,0883 x + 10,155 R^2 = 0,8349	202,224	4,08	Significante
$IRI_{médioconf}$ × ICP P(o) média três sensores 42 trechos	y = - 0,1183 x + 12,737 R^2 = 0,9411	639,048	4,08	Significante

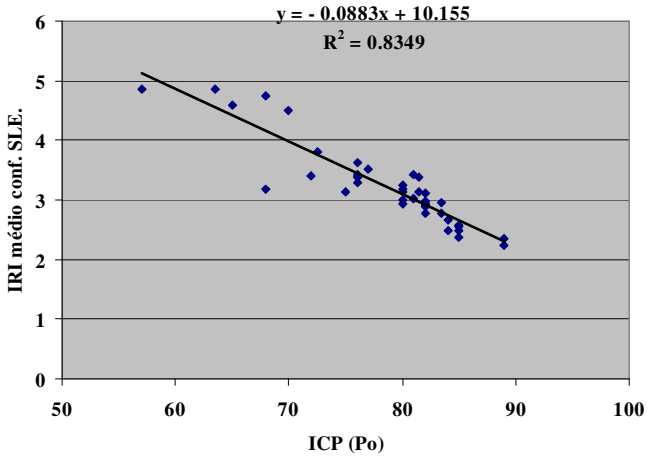


Figura 6.21 Gráfico, equação e R^2 do modelo ICP P(o) × $IRI_{médioconf}$ SLE em 42 trechos da RMF.

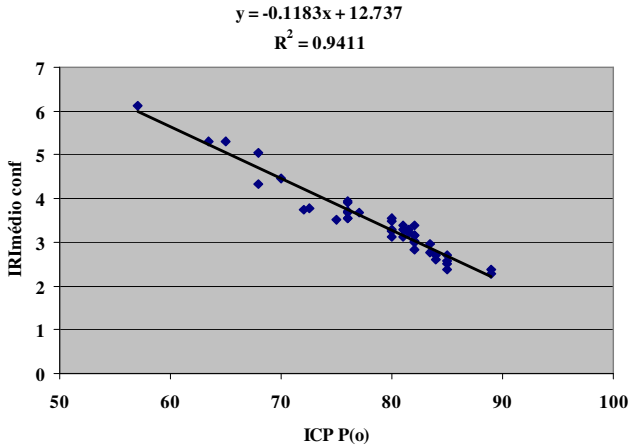


Figura 6.22 Gráfico, equação e R^2 do modelo ICP P(o) × média do IRI para as três posições dos sensores com 95% de confiabilidade em 42 trechos da RMF.

Modelo correlacionando o IRI médio e o ATR

Neste modelo foram utilizados os dados do $IRI_{médioconf}$ da Tabela 6.12, e os resultados do ATR da Tabela 5.24, aplicando 95% de confiabilidade, com os sensores na posição normal nos 72 trechos da RMF. Verifica-se que não são atendidos os critérios estabelecidos. O valor de F (0,2423) é menor do que o $\mathbf{F_{CRIT}}$ ($F_{0,05,\ 1,\ 70}$ = 3,84). Portanto, o modelo não é significante e não há correlação entre os valores do IRI e do ATR medidos com o perfilômetro inercial a laser, nos 72 trechos da RMF. Na Figura

6.23 percebe-se que o R^2 tem um valor baixíssimo, comprovando assim a afirmação acima. Os resumos estatísticos deste modelo estão no Anexo III.

Mesmo que se tivesse obtido uma correlação razoável entre o IRI e o ATR, seria temerário generalizá-la, porque esses problemas em um pavimento podem não acontecer juntos e sim de forma isolada. Destacando-se que o IRI é no sentido longitudinal e o ATR no sentido transversal. Um pavimento pode ter uma mistura bem dosada e apresentar só irregularidade e não ter deformação permanente. Entretanto, é útil ter estas duas informações em um Sistema de Gerência de Pavimentos.

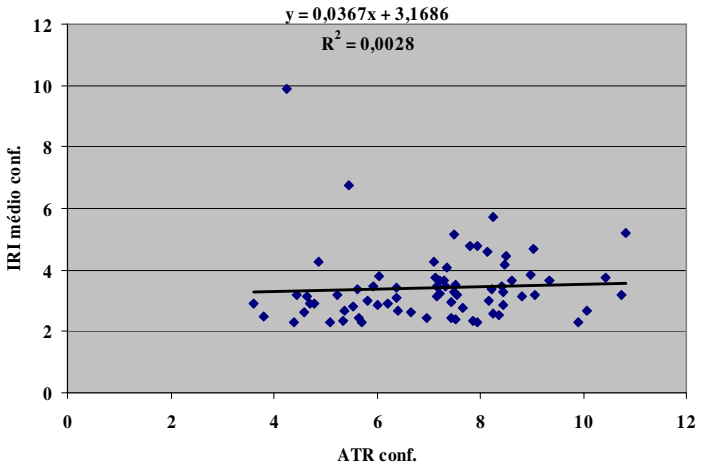


Figura 6.23 Gráfico, equação e R^2 do modelo $IRI_{médioconf}$ ×ATR com 95% de confiabilidade para SPN nos 72 trechos da RMF

Modelos correlacionando o IRI com os defeitos/severidade medidos no LVC

Para a determinação de modelos estatísticos correlacionando o IRI e os defeitos/severidades, foram utilizados os resultados do LVC efetuados em 2005 (Tabela 5.11) e do $IRI_{médioconf}$ com os sensores na posição normal, Tabela 6.12, nos 72 trechos da RMF. A análise foi feita em duas partes. A primeira considerando os três tipos de revestimento, ou seja, os 72 trechos. A segunda considerando por família de revestimento. Os resumos estatísticos dos modelos gerados estão no Anexo III.

Na análise estatística dos modelos em função do F, conforme mostrados na Tabela 6.17, considerando os 72 trechos, observa-se que não há correlação do IRI com a Trinca de bloco, o valor de F (0,051) é menor do que o $\mathbf{F_{CRIT}}$ ($F_{0,05,\ 1,\ 70}$ = 3,84). Para os outros

defeitos verifica-se que mesmo sendo atendidos os critérios para o teste F de *Snedecor* e para o *valor-P* da estatística t, os coeficientes de correlação R com a variável IRI, são pequenos, acarretando R^2, também pequeno. As Figuras 6.24 e 6.25 mostram as equações, os gráficos e os coeficientes de determinação R^2, correlacionando o $IRI_{médioconf}$ com os defeitos TF e REM, respectivamente.

Tabela 6.17 Resultado da análise dos modelos de correlação entre os valores do $IRI_{médioconf}$ e dos defeitos/severidade em função do *F* nos 72 trechos da RMF

Valores comparados	Modelo	F	F_{CRIT}	Resultado
$IRI_{médioconf}$ × TF (72 trechos)	y = 0,0462 x +2,9642 R^2 = 0,4672	59,620	3,84	Significante
$IRI_{médioconf}$ × TB (72 trechos)	-	0,051	3,84	Não é Significante
$IRI_{médioconf}$ ×REM (72 trechos)	y = 0,1227 x + 3,1515 R^2 = 0,3388	35,868	3,84	Significante
$IRI_{médioconf}$ ×AF (72 trechos)	y = 0,4195 x + 3,3592 R^2 = 0,0761	5,763	3,84	Significante
$IRI_{médioconf}$ × DES (72 trechos)	y = 0,1661 x + 3,3461 R^2 = 0,0795	6,043	3,84	Significante
$IRI_{médioconf}$ × (TF + TB) (72 trechos)	y = 0,0365 x + 2,9484 R^2 = 0,3433	35,54	3,84	Significante

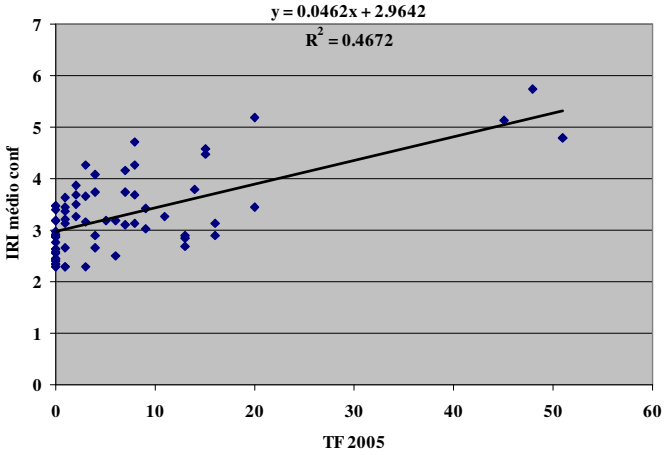


Figura 6.24 Gráfico, equação e R^2 do modelo $IRI_{médioconf}$ x TF nos 72 trechos da RMF considerando os três tipos de revestimento

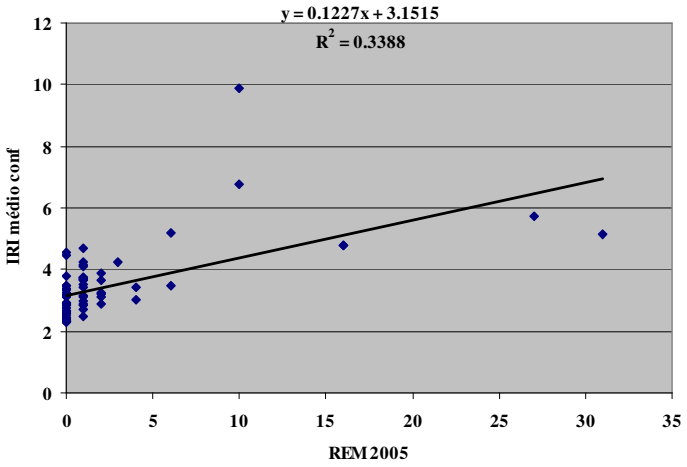


Figura 6.25 Gráfico, equação e R^2 do modelo $IRI_{médioconf}$ x REM nos 72 trechos da RMF considerando os três tipos de revestimento

A segunda parte a análise foi feita considerando os trechos por família de revestimento CBUQ, AAUQ e TSD. Dos 72 trechos selecionados, 42 têm revestimento em CBUQ, 20 em TSD e 10 AAUQ.

Na Tabela 6.18 são mostrados os resultado da análise das equações de evolução dos defeitos/severidades em função do *F* nos 42 trechos selecionados na RMF com revestimento em CBUQ. Verifica-se que os valores de *F* são maiores do que o $F_{0,05,\ 1,\ 41}$ = 4,08, valor crítico, nos defeitos TF, REM e (TF + TB) e que não há correlação entre o IRI e os defeitos TB, AFUND e DES. Na Figura 6.26 é mostrada a equação, o coeficiente de determinação (R^2) e o gráfico do modelo que correlaciona o IRI com o REM. Os demais resumos estatísticos estão no Anexo III.

A Tabela 6.19 apresenta os resultados estatísticos considerando-se os 20 trechos selecionados com revestimento em TSD. Observa-se que não há correlação entre o IRI e o defeito TB e que os valores *F* são maiores do que o $F_{0,05,\ 1,\ 19}$ = 4,39, valor crítico para os demais defeitos. Nas Figuras 6.27 e 6.28 são mostradas as equações, os coeficientes de determinação (R^2) e gráficos dos modelos que correlacionam o IRI com os defeitos trinca de fadiga (TF) e remendo (REM), respectivamente, para os revestimentos em TSD. Os demais resumos estatísticos estão no Anexo III.

Para os trechos com revestimento em AAUQ, os resultados apresentados na Tabela 6.20 indicam que só há correlação do IRI com os defeitos TF e (TF + TB). A Figura 6.29 mostra a equação, o coeficiente de determinação (R^2) e o gráfico do modelo que

correlaciona o IRI com o defeito TF para o revestimento em AAUQ. Os demais resumos estatísticos estão no Anexo III.

Tabela 6.18 Resultados da análise dos modelos de correlação entre os valores do $IRI_{médioconf}$ e dos defeitos/severidade em função do *F* em 42 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Valores comparados	Modelo	F	F_{CRIT}	Resultado
$IRI_{médioconf}$ ×TF (42 trechos CBUQ)	y = 0,1102 x +2,6743 R^2 = 0,2197	11,26	4,08	Significante
$IRI_{médioconf}$ × TB (42 trechos CBUQ)	-	0,03	4,08	Não é Significante
$IRI_{médioconf}$ × REM (42 trechos CBUQ)	y = 0,4871 x + 2,7013 R^2 = 0,7325	109,52	4,08	Significante
$IRI_{médioconf}$ ×AF (42 trechos CBUQ)	-	0,01	4,08	Não é Significante
$IRI_{médioconf}$ × DES (42 trechos CBUQ)	-	0,64	4,08	Não é Significante
$IRI_{médioconf}$ × (TF + TB) (42 trechos CBUQ)	y = 0,1226 x + 2,4192 R^2 = 0,2926	15,71	4,08	Significante

Tabela 6.19 Resultados da análise dos modelos de correlação entre os valores do $IRI_{médioconf}$ e dos defeitos/severidade em função do *F* nos 20 trechos da RMF com revestimento em TSD

Valores comparados	Modelo	F	F_{CRIT}	Resultado
$IRI_{médioconf}$ × TF (20 trechos TSD)	y = 0,0344 x + 3, 506 R^2 = 0,5986	26,84	4,39	Significante
$IRI_{médioconf}$ × TB (20 trechos TSD)	-	2,34	4,39	Não é Significante
$IRI_{médioconf}$ × REM (20 trechos TSD)	y = 0,068 x + 3,5914 R^2 = 0,5688	23,74	4,39	Significante
$IRI_{médioconf}$ × AF (20 trechos TSD)	y = 0,3626 x + 3,8158 R^2 = 0,3644	10,31	4,39	Significante
$IRI_{médioconf}$ × DES (20 trechos TSD)	y = 0,1503 x + 3,7912 R^2 = 0,3992	11,96	4,39	Significante
$IRI_{médioconf}$ × (TF + TB) (20 trechos TSD)	y = 0,0337 x + 3,5016 R^2 = 0,5964	26,60	4,39	Significante

Tabela 6.20 Resultados da análise dos modelos de correlação entre os valores do $IRI_{médioconf}$ e dos defeitos/severidade em função do *F* nos 10 trechos da RMF com revestimento em AAUQ

Valores comparados	Modelo	F	F_{CRIT}	Resultado
$IRI_{médioconf}$ × TF (10 trechos AAUQ)	y = 0,1186 x + 2,7413 R^2 = 0,7813	28,58	5,12	Significante
$IRI_{médioconf}$ × TB (10 trechos AAUQ)	-	0,02	5,12	Não é Significante
$IRI_{médioconf}$ ×REM (10 trechos AAUQ)	-	0,001	5,12	Não é Significante
$IRI_{médioconf}$ × AF (10 trechos AAUQ)	-	0,000	5,12	Não é Significante
$IRI_{médioconf}$ × DES (10 trechos AAUQ)	-	0,000	5,12	Não é Significante
$IRI_{médioconf}$ × (TF + TB) (10 trechos AAUQ)	y = 0,0952 x + 2,3859 R^2 = 0,5534	7,43	5,12	Significante

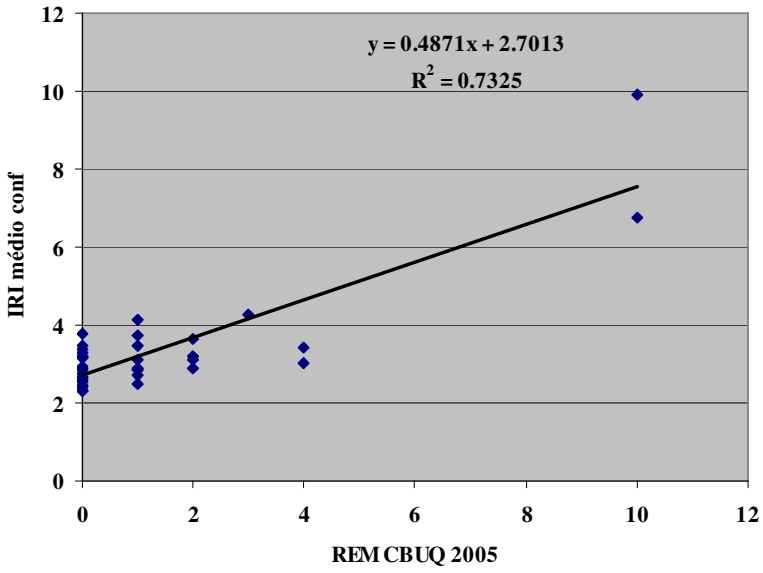


Figura 6.26 Gráfico, equação e R^2 do modelo $IRI_{médioconf}$ × REM em 42 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

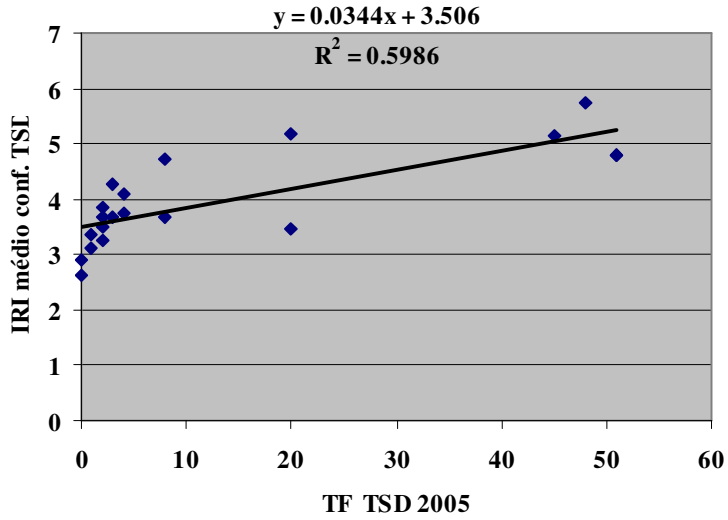


Figura 6.27 Gráfico, equação e R^2 do modelo $IRI_{médioconf}$ × TF nos 20 trechos da RMF com revestimento em TSD

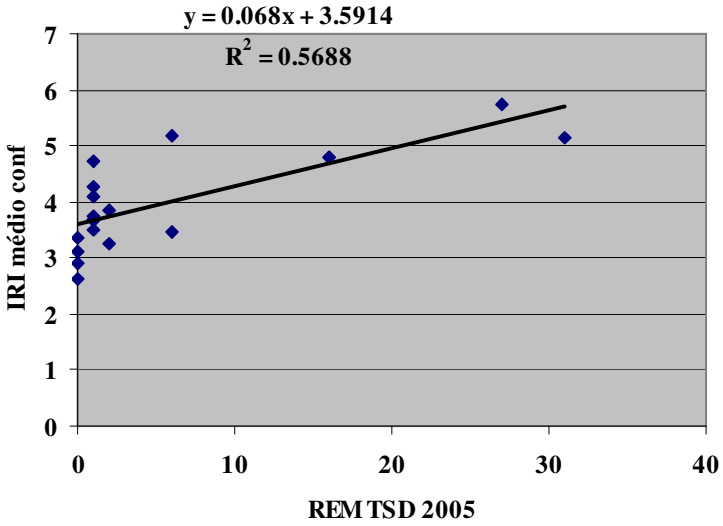


Figura 6.28 Gráfico, equação e R^2 do modelo $IRI_{médioconf}$ × REM nos 20 trechos da RMF com revestimento em TSD

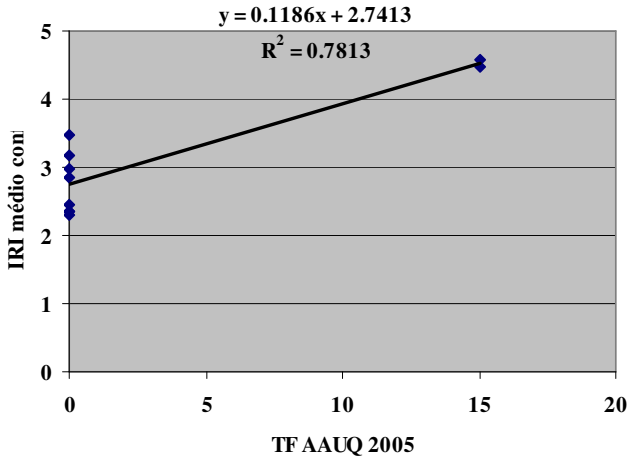


Figura 6.29 Gráfico, equação e R^2 do modelo $IRI_{médioconf}$ ×TF nos 10 trechos da RMF com revestimento em AAUQ

Modelos correlacionando os valores do IRI, com a deflexão e com o número estrutural corrigido

Para a determinação de modelos estatísticos correlacionando o IRI com a deflexão (DEF) e com o número estrutural corrigido (NEC), foram utilizados os resultados do $IRI_{médioconf}$ com os sensores na posição normal, Tabela 6.12 e os dados da DEF e do NEC da Tabela 5.30, nos 72 trechos da RMF. Os resumos estatísticos destes modelos estão no Anexo III.

Na análise estatística dos modelos em função do *F*, conforme mostrados na Tabela 6.21, observa-se que são atendidos os critérios para o teste F de *Snedecor* e para o *valor-P* da estatística t. As Figuras 6.30 e 6.31 mostram as equações, os gráficos e os coeficientes de determinação R^2, correlacionando o $IRI_{médioconf}$ com a DEF e com o NEC, respectivamente.

Tabela 6.21 Resultado da análise dos modelos de correlação entre os valores do IRI, com a DEF e o NEC em função do *F* nos 72 trechos da RMF

Valores comparados	Modelo	F	F_{CRIT}	Resultado
$IRI_{médioconf}$ × DEF	y = 0,0462 x + 1,4591 R^2 = 0,3419	35,33	3,84	Significante
$IRI_{médioconf}$ × NEC	y = - 0,5209 x + 6,3593 R^2 = 0,3297	32,46	3,84	Significante

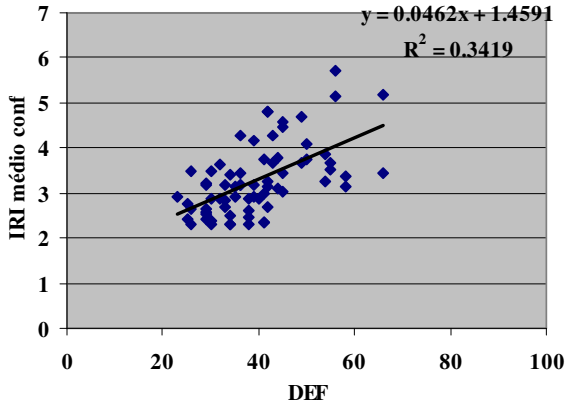


Figura 6.30 Gráfico, equação e R^2 do modelo $IRI_{médioconf}$ × DEF nos 72 trechos da RMF

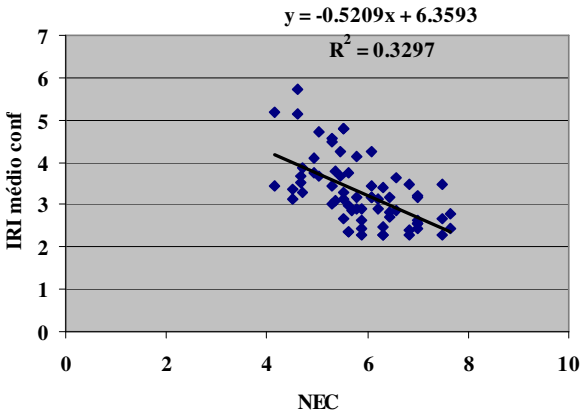


Figura 6.31 Gráfico, equação e R^2 do modelo $IRI_{médioconf}$ × NEC nos 72 trechos da RMF

Modelos de regressão múltipla

Foram gerados dois modelos estatísticos de regressão múltipla utilizando o programa SPSS. No primeiro modelo o IRI foi correlacionado com a DEF, com o ICP e com a TF, equação 6.3. O segundo modelo correlacionou o ICP com o IRI, com o NEC e com a TF, equação 6.4. Um terceiro modelo foi estudado tentando introduzir uma outra variável independente, o ATR, porém a análise estatística indicou a pouca contribuição desta variável aos modelos. A inclusão de uma variável explicativa adicional depende de uma avaliação da relação "benefício-custo", ou mais especificamente, em uma avaliação do quanto se ganha no poder de explicação da variável Y sem que haja

problemas de expressiva multicolinearidade entre a variável explicativa adicional e as outras variáveis explicativas já inclusas. Os modelos têm as seguintes expressões:

$$IRI = - 0{,}141\ ICP - 0{,}0211\ DEF - 0{,}00641\ TF + 15{,}636 \quad (6.3)$$

$R^2 = 0{,}86$

$$ICP = - 8{,}303\ IRI + 0{,}812\ NEC - 0{,}0050\ TF + 101{,}844 \quad (6.4)$$

$R^2 = 0{,}93$

Foram utilizados nestes modelos os resultados do $IRI_{médioconf}$ com os sensores na posição normal, Tabela 6.12, os dados da DEF e do NEC da Tabela 5.30, e os dados da TF da Tabela 6.5, nos 72 trechos da RMF. Os resumos estatísticos destes modelos estão no Anexo III. Verifica-se que são atendidos os critérios para o teste F de *Snedecor* e para o *valor-P* da estatística t, nos dois modelos. Os valores de *F* são maiores do que o *F* crítico, sendo $F_{0,05,\ 3,\ 68} = 2{,}60$ e $F_{0,05,\ 4,\ 67} = 2{,}53$. Portanto, rejeita-se a hipótese nula e existe uma confiança de 95% de aceitação da significância dos modelos. Na avaliação dos dois modelos constata-se que a maior contribuição para os altos valores do R^2 (0,86 e 0,93) e consequentemente, grande poder de explicação é devida a forte correlação entre os valores do IRI e a variável explicativa ICP, porém a inclusão das outras variáveis aumentou o poder de explicação dos modelos. Estes modelos também podem ser utilizados como alternativas para um Sistema de Gerência de Pavimentos em nível de rede dos estados do nordeste, onde as condições do clima e de tráfego são semelhantes.

6.4 Evolução do IRI em função do ICP nos 72 trechos deste estudo

Nesta análise será utilizado o modelo de regressão para os 72 trechos da RMF considerando os sensores na posição normal, equação 6.5, abaixo:

$$IRI = 13 - 0{,}12\ ICP \quad (6.5)$$

$R^2 = 0{,}84$

Com a utilização do modelo de desempenho dado pela equação 6.5 e os valores da curva de desempenho do ICP retirados das Tabelas 6.2, 6.3 e 6.4, foram obtidos os valores, constantes na Tabela 6.22, para a evolução do IRI em todos os trechos deste estudo até o 10º ano.

Tabela 6.22 Valores do IRI médio sensores normais com confiabilidade de 95% calculados em função da equação de correlação y =12,993 - 0,1191*ICP

Trecho	Valores do IRI atual (2006) até o 10º ano ,										
	(IRI_0)	(IRI)	(IRI_2)	(IRI_3)	(IRI_4)	(IRI_5)	(IRI_6)	(IRI_7)	(IRI_8)	(IRI_9)	(IRI_{10})
01-025ECE0010D	4,30	4,56	4,84	5,14	5,44	5,76	6,10	6,45	6,81	7,18	7,57
02-025ECE0010E	4,18	4,43	4,70	4,99	5,29	5,60	5,93	6,27	6,63	7,00	7,38
03-025ECE0030D	4,89	5,25	5,63	6,02	6,42	6,84	7,28	7,74	8,22	8,70	9,17
04-025ECE0030E	4,89	5,25	5,63	6,02	6,42	6,84	7,28	7,74	8,22	8,70	9,17
05-025ECE0050D	2,75	2,99	3,25	3,53	3,82	4,13	4,45	4,79	5,14	5,50	5,89
06-025ECE0050E	2,69	2,93	3,19	3,46	3,75	4,06	4,38	4,71	5,06	5,42	5,80
07-040ECE0010D	3,41	3,64	3,89	4,15	4,42	4,70	5,00	5,30	5,62	5,94	6,29
08-040ECE0010E	3,11	3,35	3,59	3,84	4,10	4,37	4,65	4,94	5,24	5,55	5,88
09-040ECE0030D	2,69	2,92	3,15	3,39	3,63	3,88	4,14	4,41	4,70	4,99	5,29
10-040ECE0030E	3,47	3,70	3,95	4,22	4,49	4,77	5,07	5,37	5,69	6,02	6,37
11-040ECE0050D	2,04	2,23	2,44	2,64	2,86	3,09	3,32	3,56	3,81	4,07	4,34
12-040ECE0050E	2,04	2,23	2,44	2,64	2,86	3,09	3,32	3,56	3,81	4,07	4,34
13-040ECE0070D	1,92	2,11	2,30	2,51	2,72	2,94	3,17	3,40	3,65	3,90	4,17
14-040ECE0070E	1,92	2,11	2,30	2,51	2,72	2,94	3,17	3,40	3,65	3,90	4,17
15-040ECE0090D	2,63	2,86	3,09	3,32	3,56	3,81	4,07	4,34	4,62	4,90	5,21
16-040ECE0090E	2,63	2,86	3,09	3,32	3,56	3,81	4,07	4,34	4,62	4,90	5,21
17-040ECE0110D	2,99	3,23	3,47	3,71	3,97	4,23	4,51	4,79	5,09	5,40	5,72
18-040ECE0110E	3,47	3,70	3,95	4,22	4,49	4,77	5,07	5,37	5,69	6,02	6,37
19-040ECE0130D	2,10	2,29	2,50	2,71	2,93	3,16	3,39	3,64	3,89	4,15	4,43
20-040ECE0130E	2,10	2,29	2,50	2,71	2,93	3,16	3,39	3,64	3,89	4,15	4,43
21-040ECE0150D	2,10	2,29	2,50	2,71	2,93	3,16	3,39	3,64	3,89	4,15	4,43
22-040ECE0150E	2,10	2,29	2,50	2,71	2,93	3,16	3,39	3,64	3,89	4,15	4,43
23-040ECE0170D	2,10	2,29	2,50	2,71	2,93	3,16	3,39	3,64	3,89	4,15	4,43
24-040ECE0170E	2,10	2,29	2,50	2,71	2,93	3,16	3,39	3,64	3,89	4,15	4,43
25-060ECE0010D	3,82	4,06	4,32	4,59	4,88	5,18	5,49	5,81	6,14	6,49	6,86
26-060ECE0010E	3,35	3,58	3,83	4,09	4,36	4,64	4,93	5,23	5,54	5,87	6,20
27-060ECE0030D	3,94	4,18	4,44	4,72	5,01	5,31	5,62	5,95	6,29	6,65	7,02
28-060ECE0030E	3,47	3,70	3,95	4,22	4,49	4,77	5,07	5,37	5,69	6,02	6,37
29-060ECE0050D	3,29	3,52	3,77	4,03	4,29	4,57	4,86	5,15	5,47	5,79	6,12
30-060ECE0050E	3,29	3,52	3,77	4,03	4,29	4,57	4,86	5,15	5,47	5,79	6,12
31-060ECE0070D	3,05	3,29	3,53	3,78	4,03	4,30	4,58	4,86	5,16	5,47	5,80
32-060ECE0070E	3,05	3,29	3,53	3,78	4,03	4,30	4,58	4,86	5,16	5,47	5,80
33-060ECE0090D	3,35	3,58	3,83	4,09	4,36	4,64	4,93	5,23	5,54	5,87	6,20
34-060ECE0090E	3,35	3,58	3,83	4,09	4,36	4,64	4,93	5,23	5,54	5,87	6,20
35-060ECE0110D	3,23	3,47	3,71	3,96	4,23	4,50	4,79	5,08	5,39	5,71	6,04
36-060ECE0110E	3,23	3,47	3,71	3,96	4,23	4,50	4,79	5,08	5,39	5,71	6,04
37-060ECE0130D	2,99	3,23	3,47	3,71	3,97	4,23	4,51	4,79	5,09	5,40	5,72
38-060ECE0130E	2,99	3,23	3,47	3,71	3,97	4,23	4,51	4,79	5,09	5,40	5,72
39-060ECE0150D	3,23	3,47	3,71	3,96	4,23	4,50	4,79	5,08	5,39	5,71	6,04
40-060ECE0150E	3,23	3,47	3,71	3,96	4,23	4,50	4,79	5,08	5,39	5,71	6,04
41-065ECE0010D	6,20	6,56	6,90	7,27	7,66	8,08	8,51	8,96	9,40	9,81	10,20
42-065ECE0010E	7,40	7,70	8,12	8,57	9,05	9,53	10,00	10,42	10,79	11,10	11,37
43-065ECE0030D	2,87	3,11	3,35	3,59	3,84	4,10	4,37	4,65	4,94	5,24	5,55
44-065ECE0030E	2,57	2,80	3,02	3,25	3,49	3,74	3,99	4,26	4,53	4,82	5,12
45-065ECE0050D	2,57	2,80	3,02	3,25	3,49	3,74	3,99	4,26	4,53	4,82	5,12
46-065ECE0050E	2,57	2,80	3,02	3,25	3,49	3,74	3,99	4,26	4,53	4,82	5,12
47-085ECE0030D	5,43	5,81	6,20	6,60	7,02	7,46	7,94	8,42	8,92	9,40	9,86
48-085ECE0030E	6,20	6,66	7,06	7,49	7,95	8,46	8,98	9,50	9,99	10,43	10,81
49-085ECE0050D	4,36	4,72	5,08	5,46	5,84	6,24	6,65	7,09	7,54	8,00	8,47
50-085ECE0050E	5,25	5,61	6,00	6,40	6,81	7,24	7,69	8,18	8,67	9,17	9,64
51-085ECE0070D	3,94	4,29	4,65	5,01	5,38	5,76	6,16	6,57	7,00	7,45	7,91
52-085ECE0070E	3,94	4,29	4,65	5,01	5,38	5,76	6,16	6,57	7,00	7,45	7,91
53-085ECE0090D	3,94	4,29	4,65	5,01	5,38	5,76	6,16	6,57	7,00	7,45	7,91
54-085ECE0090E	4,42	4,78	5,14	5,52	5,91	6,30	6,72	7,16	7,61	8,08	8,55
55-085ECE0110D	3,94	4,29	4,65	5,01	5,38	5,76	6,16	6,57	7,00	7,45	7,91
56-085ECE0110E	3,94	4,29	4,65	5,01	5,38	5,76	6,16	6,57	7,00	7,45	7,91
57-085ECE0130D	3,47	3,79	4,13	4,47	4,83	5,19	5,57	5,96	6,37	6,80	7,23
58-085ECE0130E	4,06	4,42	4,78	5,14	5,52	5,91	6,30	6,72	7,16	7,61	8,08
59-085ECE0150D	3,47	3,79	4,13	4,47	4,83	5,19	5,57	5,96	6,37	6,80	7,23
60-085ECE0150E	4,89	5,25	5,63	6,02	6,42	6,84	7,28	7,74	8,22	8,70	9,17

Tabela 6.22 Valores do IRI médio sensores normais com confiabilidade de 95% calculados em função da equação de correlação y =12,993 - 0,1191*ICP

Trecho	Valores do IRI atual (2006) até o 10º ano ,										
	(IRI_0)	(IRI)	(IRI_2)	(IRI_3)	(IRI_4)	(IRI_5)	(IRI_6)	(IRI_7)	(IRI_8)	(IRI_9)	(IRI_{10})
61-085ECE0170D	3,23	3,54	3,87	4,21	4,55	4,91	5,28	5,66	6,06	6,47	6,89
62-085ECE0170E	3,47	3,79	4,13	4,47	4,83	5,19	5,57	5,96	6,37	6,80	7,23
63-090ECE0010D	4,89	5,25	5,63	6,02	6,42	6,84	7,28	7,74	8,22	8,70	9,17
64-090ECE0010E	4,66	5,01	5,39	5,77	6,16	6,57	7,00	7,45	7,92	8,39	8,86
65-341ECE0010D	3,23	3,50	3,79	4,10	4,42	4,76	5,11	5,47	5,85	6,25	6,66
66-341ECE0010E	3,23	3,50	3,79	4,10	4,42	4,76	5,11	5,47	5,85	6,25	6,66
67-341ECE0030D	2,87	3,11	3,37	3,65	3,95	4,26	4,59	4,93	5,29	5,67	6,05
68-341ECE0030E	2,87	3,11	3,37	3,65	3,95	4,26	4,59	4,93	5,29	5,67	6,05
69-341ECE0050D	2,39	2,63	2,88	3,15	3,43	3,72	4,03	4,35	4,68	5,02	5,39
70-341ECE0050E	2,39	2,63	2,88	3,15	3,43	3,72	4,03	4,35	4,68	5,02	5,39
71-341ECE0070D	2,87	3,17	3,48	3,80	4,14	4,48	4,84	5,21	5,58	5,98	6,39
72-341ECE0070E	2,87	3,17	3,48	3,80	4,14	4,48	4,84	5,21	5,58	5,98	6,39

Para comparar o modelo de previsão da condição do pavimento pelo IRI obtido nesta pesquisa com o de outra referência foi escolhido o estudo de DEWAN e SMITH (2002). Os referidos autores obtiveram um modelo que correlaciona o IRI com o PCI, neste caso utilizando medições dentro das especificações de obtenção deste segundo, que é um índice de condição composto para o segmento da rodovia em estudo, calculado para os tipos de defeitos presentes na superfície do pavimento. Os valores do PCI variam de 0 (zero) para a pior condição a 100 (cem) para a melhor. O modelo desenvolvido tem a expressão contida na equação 6.6:

$$IRI = 0{,}15\ (100 - PCI) = 15 - 0{,}15\ PCI \qquad (6.6)$$

A Tabela 6.23 mostra os valores obtidos para o IRI em todos os trechos deste estudo até o 10º ano, utilizando o modelo de desempenho da equação 6.6 e os valores da curva de desempenho do ICP retirados das Tabelas 6.2, 6.3 e 6.4. Neste caso considerando que o PCI e o ICP podem ser tomados como equivalentes embora obtidos de formas distintas.

Tabela 6.23 Valores do IRI médio sensores normais com confiabilidade de 95% calculados em função da equação de DEWAN e SMITH, (2002). y = 0.15*(100 - ICP)

Trecho	Valores do IRI atual (2006) até o 10º ano ,										
	(IRI_0)	(IRI)	(IRI_2)	(IRI_3)	(IRI_4)	(IRI_5)	(IRI_6)	(IRI_7)	(IRI_8)	(IRI_9)	(IRI_{10})
01-025ECE0010D	4,05	4,38	4,73	5,11	5,49	5,90	6,32	6,75	7,21	7,68	8,17
02-025ECE0010E	3,90	4,22	4,56	4,92	5,30	5,69	6,11	6,53	6,98	7,45	7,93
03-025ECE0030D	4,80	5,25	5,73	6,22	6,72	7,25	7,80	8,38	8,99	9,59	10,19
04-025ECE0030E	4,80	5,25	5,73	6,22	6,72	7,25	7,80	8,38	8,99	9,59	10,19
05-025ECE0050D	2,10	2,40	2,73	3,08	3,45	3,83	4,24	4,67	5,11	5,57	6,05
06-025ECE0050E	2,03	2,33	2,65	3,00	3,36	3,75	4,15	4,57	5,01	5,47	5,95
07-040ECE0010D	2,93	3,23	3,54	3,87	4,21	4,56	4,93	5,31	5,71	6,12	6,55
08-040ECE0010E	2,55	2,85	3,16	3,47	3,80	4,14	4,49	4,85	5,23	5,63	6,04
09-040ECE0030D	2,03	2,31	2,60	2,90	3,21	3,53	3,85	4,20	4,55	4,92	5,30
10-040ECE0030E	3,00	3,30	3,62	3,95	4,29	4,65	5,02	5,40	5,80	6,22	6,66
11-040ECE0050D	1,20	1,45	1,70	1,97	2,24	2,52	2,82	3,12	3,43	3,76	4,10
12-040ECE0050E	1,20	1,45	1,70	1,97	2,24	2,52	2,82	3,12	3,43	3,76	4,10
13-040ECE0070D	1,05	1,29	1,54	1,80	2,06	2,34	2,63	2,92	3,23	3,55	3,88
14-040ECE0070E	1,05	1,29	1,54	1,80	2,06	2,34	2,63	2,92	3,23	3,55	3,88

Tabela 6.23 Valores do IRI médio sensores normais com confiabilidade de 95% calculados em função da equação de DEWAN e SMITH, (2002). y = 0.15*(100 - ICP)

Trecho	Valores do IRI atual (2006) até o 10º ano ,										
	(IRI_0)	(IRI)	(IRI_2)	(IRI_3)	(IRI_4)	(IRI_5)	(IRI_6)	(IRI_7)	(IRI_8)	(IRI_9)	(IRI_{10})
15-040ECE0090D	1,95	2,24	2,52	2,82	3,12	3,43	3,76	4,10	4,45	4,81	5,19
16-040ECE0090E	1,95	2,24	2,52	2,82	3,12	3,43	3,76	4,10	4,45	4,81	5,19
17-040ECE0110D	2,40	2,70	3,00	3,31	3,64	3,97	4,31	4,67	5,04	5,43	5,83
18-040ECE0110E	3,00	3,30	3,62	3,95	4,29	4,65	5,02	5,40	5,80	6,22	6,66
19-040ECE0130D	1,28	1,53	1,78	2,05	2,33	2,61	2,91	3,22	3,54	3,87	4,21
20-040ECE0130E	1,28	1,53	1,78	2,05	2,33	2,61	2,91	3,22	3,54	3,87	4,21
21-040ECE0150D	1,28	1,53	1,78	2,05	2,33	2,61	2,91	3,22	3,54	3,87	4,21
22-040ECE0150E	1,28	1,53	1,78	2,05	2,33	2,61	2,91	3,22	3,54	3,87	4,21
23-040ECE0170D	1,28	1,53	1,78	2,05	2,33	2,61	2,91	3,22	3,54	3,87	4,21
24-040ECE0170E	1,28	1,53	1,78	2,05	2,33	2,61	2,91	3,22	3,54	3,87	4,21
25-060ECE0010D	3,45	3,75	4,07	4,42	4,78	5,15	5,54	5,95	6,37	6,81	7,27
26-060ECE0010E	2,85	3,15	3,46	3,79	4,13	4,48	4,84	5,22	5,61	6,02	6,45
27-060ECE0030D	3,60	3,90	4,23	4,58	4,94	5,32	5,72	6,13	6,56	7,01	7,48
28-060ECE0030E	3,00	3,30	3,62	3,95	4,29	4,65	5,02	5,40	5,80	6,22	6,66
29-060ECE0050D	2,78	3,08	3,39	3,71	4,04	4,39	4,75	5,13	5,52	5,93	6,35
30-060ECE0050E	2,78	3,08	3,39	3,71	4,04	4,39	4,75	5,13	5,52	5,93	6,35
31-060ECE0070D	2,48	2,78	3,08	3,39	3,72	4,05	4,40	4,76	5,14	5,53	5,94
32-060ECE0070E	2,48	2,78	3,08	3,39	3,72	4,05	4,40	4,76	5,14	5,53	5,94
33-060ECE0090D	2,85	3,15	3,46	3,79	4,13	4,48	4,84	5,22	5,61	6,02	6,45
34-060ECE0090E	2,85	3,15	3,46	3,79	4,13	4,48	4,84	5,22	5,61	6,02	6,45
35-060ECE0110D	2,70	3,00	3,31	3,63	3,96	4,31	4,66	5,04	5,42	5,83	6,25
36-060ECE0110E	2,70	3,00	3,31	3,63	3,96	4,31	4,66	5,04	5,42	5,83	6,25
37-060ECE0130D	2,40	2,70	3,00	3,31	3,64	3,97	4,31	4,67	5,04	5,43	5,83
38-060ECE0130E	2,40	2,70	3,00	3,31	3,64	3,97	4,31	4,67	5,04	5,43	5,83
39-060ECE0150D	2,70	3,00	3,31	3,63	3,96	4,31	4,66	5,04	5,42	5,83	6,25
40-060ECE0150E	2,70	3,00	3,31	3,63	3,96	4,31	4,66	5,04	5,42	5,83	6,25
41-065ECE0010D	6,45	6,90	7,33	7,79	8,28	8,81	9,36	9,92	10,47	11,00	11,48
42-065ECE0010E	7,95	8,34	8,86	9,43	10,04	10,64	11,22	11,76	12,22	12,62	12,95
43-065ECE0030D	2,25	2,55	2,85	3,16	3,47	3,80	4,14	4,49	4,85	5,23	5,63
44-065ECE0030E	1,88	2,16	2,44	2,73	3,03	3,34	3,67	4,00	4,35	4,71	5,08
45-065ECE0050D	1,88	2,16	2,44	2,73	3,03	3,34	3,67	4,00	4,35	4,71	5,08
46-065ECE0050E	1,88	2,16	2,44	2,73	3,03	3,34	3,67	4,00	4,35	4,71	5,08
47-085ECE0030D	5,48	5,95	6,44	6,95	7,48	8,04	8,63	9,25	9,87	10,48	11,05
48-085ECE0030E	6,45	7,02	7,53	8,06	8,65	9,29	9,95	10,60	11,22	11,77	12,25
49-085ECE0050D	4,13	4,58	5,04	5,51	5,99	6,49	7,01	7,56	8,13	8,71	9,30
50-085ECE0050E	5,25	5,70	6,20	6,69	7,21	7,75	8,33	8,93	9,56	10,18	10,78
51-085ECE0070D	3,60	4,04	4,49	4,94	5,41	5,89	6,39	6,91	7,45	8,02	8,60
52-085ECE0070E	3,60	4,04	4,49	4,94	5,41	5,89	6,39	6,91	7,45	8,02	8,60
53-085ECE0090D	3,60	4,04	4,49	4,94	5,41	5,89	6,39	6,91	7,45	8,02	8,60
54-085ECE0090E	4,20	4,65	5,11	5,59	6,07	6,58	7,10	7,65	8,22	8,81	9,40
55-085ECE0110D	3,60	4,04	4,49	4,94	5,41	5,89	6,39	6,91	7,45	8,02	8,60
56-085ECE0110E	3,60	4,04	4,49	4,94	5,41	5,89	6,39	6,91	7,45	8,02	8,60
57-085ECE0130D	3,00	3,41	3,83	4,27	4,72	5,18	5,65	6,15	6,66	7,19	7,74
58-085ECE0130E	3,75	4,20	4,65	5,11	5,59	6,07	6,58	7,10	7,65	8,22	8,81
59-085ECE0150D	3,00	3,41	3,83	4,27	4,72	5,18	5,65	6,15	6,66	7,19	7,74
60-085ECE0150E	4,80	5,25	5,73	6,22	6,72	7,25	7,80	8,38	8,99	9,59	10,19
61-085ECE0170D	2,70	3,10	3,51	3,93	4,37	4,82	5,28	5,76	6,26	6,78	7,32
62-085ECE0170E	3,00	3,41	3,83	4,27	4,72	5,18	5,65	6,15	6,66	7,19	7,74
63-090ECE0010D	4,80	5,25	5,73	6,22	6,72	7,25	7,80	8,38	8,99	9,59	10,19
64-090ECE0010E	4,50	4,95	5,42	5,90	6,40	6,91	7,45	8,02	8,60	9,20	9,79
65-341ECE0010D	2,70	3,05	3,41	3,80	4,20	4,63	5,07	5,53	6,01	6,51	7,03
66-341ECE0010E	2,70	3,05	3,41	3,80	4,20	4,63	5,07	5,53	6,01	6,51	7,03
67-341ECE0030D	2,25	2,55	2,88	3,23	3,61	4,01	4,42	4,85	5,30	5,77	6,26
68-341ECE0030E	2,25	2,55	2,88	3,23	3,61	4,01	4,42	4,85	5,30	5,77	6,26
69-341ECE0050D	1,65	1,95	2,27	2,60	2,95	3,32	3,71	4,11	4,53	4,96	5,42
70-341ECE0050E	1,65	1,95	2,27	2,60	2,95	3,32	3,71	4,11	4,53	4,96	5,42
71-341ECE0070D	2,25	2,63	3,02	3,43	3,85	4,28	4,73	5,19	5,67	6,16	6,68
72-341ECE0070E	2,25	2,63	3,02	3,43	3,85	4,28	4,73	5,19	5,67	6,16	6,68

A título de exemplo, as Figuras 6.32, 6.33 e 6.34, mostram a evolução do IRI, considerando os dois modelos para comparação, nos trechos 085ECE0070D em TSD, 025ECE030D em AAUQ e 040ECE0030E em CBUQ, respectivamente. Nestas Figuras para distinção das variáveis representadas, o IRI obtido com a expressão 6.6 foi nomeado de $IRI_{D\&S}$ e o obtido nesta pesquisa, equação 6.5, foi nomeado $IRI_{esta\ pesquisa}$. A concordância entre os valores de evolução do IRI é bastante boa. Isto mostra que, pelo menos para um modelo inicial de previsão de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) que não possa dispor ainda de séries históricas, a previsão da condição do pavimento utilizando o processo de Markov, a partir de opiniões de técnicos bem experientes e conhecedores da malha analisada, pode ser uma alternativa viável. É evidente que um SGP deve procurar sempre reavaliar seus modelos de desempenho à medida que o banco de dados vai sendo completado, mas é preciso às vezes lançar mão de um primeiro modelo estimado.

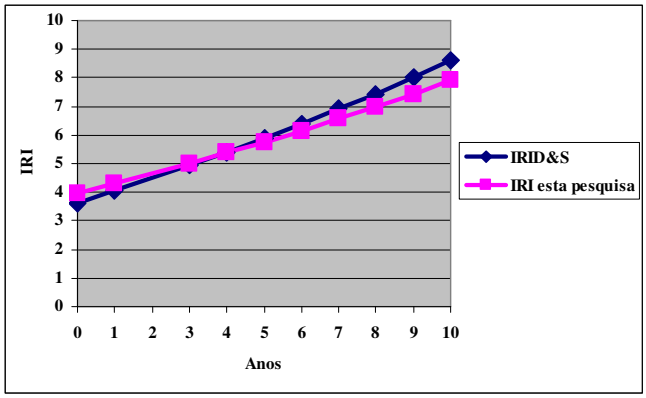


Figura 6.32 Evolução do IRI no trecho 085ECE0070D em TSD, pelos modelos $IRI_{D\&S}$ e $IRI_{esta\ pesquisa}$

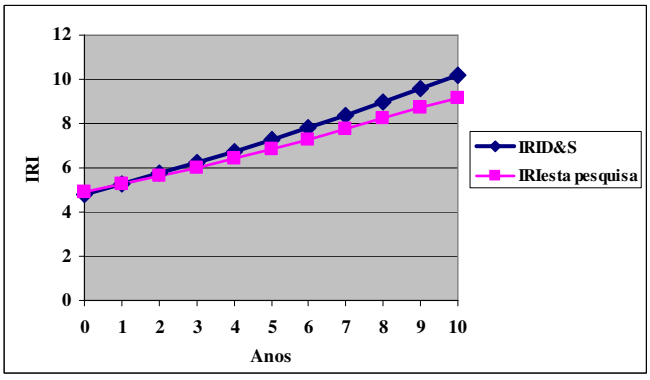


Figura 6.33 Evolução do IRI no trecho 025ECE0030D em AAUQ, pelos modelos $IRI_{D\&S}$ e $IRI_{esta\ pesquisa}$

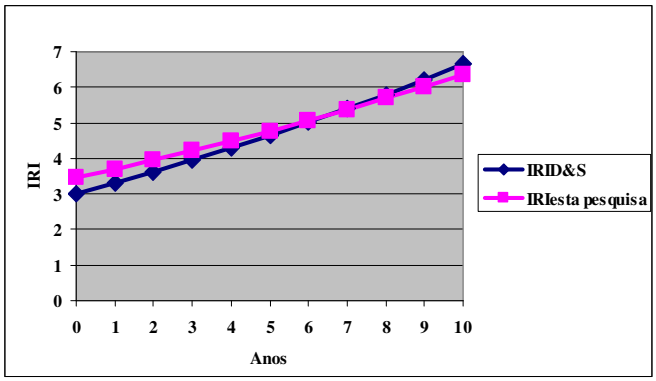


Figura 6.34 Evolução do IRI no trecho 040ECE0030E em CBUQ, pelos modelos $IRI_{D\&S}$ e $IRI_{esta\ pesquisa}$

A previsão da evolução do IRI através de modelos permite que sejam projetadas as estratégias de manutenção e reabilitação, M&R, utilizando como critérios os valores limites e os respectivos conceitos em função do IRI, constantes na Tabela 6.24, propostos pelo autor desta pesquisa, fundamentado também na opinião de técnicos especialistas. Os valores limites adotados para intervenção, utilizando como estratégia o recapeamento, podem ser estabelecidos a partir do IRI com o conceito mau. Os valores propostos na Tabela 6.24, são compatíveis com a malha rodoviária estadual do Ceará, por refletirem as condições climáticas, os volumes de tráfego e a diversidade de materiais de subsolos, além de outros fatores, podendo também ser aplicados em outras malhas rodoviárias que a ela se assemelhem, principalmente na região nordeste do Brasil. A utilização do IRI como parâmetro para planejamento das ações de M&R, possibilita que o tomador de decisão defina as prioridades para intervenções periódicas, bem como preestabeleça as soluções, os custos e as épocas adequadas através dos Planos Plurianuais de Investimentos (PPIs). Deve ser destacado que a definição dos investimentos em manutenção por parte de um órgão rodoviário passa por um processo decisório de elevada complexidade. O sistema deve oferecer um conjunto de cenários coerentes, saídos de diferentes séries de hipóteses, de forma a permitir que sejam testadas e comparadas as estratégias e políticas alternativas.

Adotando o critério da Tabela 6.24 e os valores do $IRI_{médioconf.}$ da Tabela 6.12, no banco de dados desta pesquisa, 51 trechos estão em conceito bom, 18 em regular, dois em mau e um péssimo.

Tabela 6.24 Conceitos em função dos valores limites do IRI propostos nesta pesquisa

Conceito	IRI (m/km)
Excelente	Até 2,0
Bom	2,0 – 3,5
Regular	3,6 – 5,5
Mau	5,6 – 7,5
Péssimo	> 7,5

6.5 Evolução do IRI utilizando o HDM 4

O *software* HDM 4 permite que se faça uma avaliação técnica da previsão de evolução do IRI em função das estratégias de manutenção adotadas para um determinado projeto ou trecho, auxiliando no planejamento destas intervenções. O programa pode ser utilizado agrupando dados básicos coletados e coeficientes de calibração na sua configuração, para minimizar as quantidades de dados que devem combinar para uma determinada aplicação. A composição do tráfego, as características dos veículos e os custos unitários dos veículos utilizados nesta análise são mostrados nas Tabelas 6.25, 6.26 e 6.27. Entre os 72 trechos desta pesquisa, como exemplos ilustrativos das possibilidades deste programa, escolhemos um da CE 040, um da CE 060 e um da CE 085, para os quais foram propostas estratégias de manutenção com a finalidade de obter a previsão da evolução do IRI nos próximos 20 anos, nos respectivos trechos. Os resultados e as análises são a seguir apresentados, destacando que *base alternative* é o *default* do programa HDM 4. MANUTEN A, MANUTEN B e MANUTEN C, são as estratégias de manutenção propostas.

Tabela 6.25 Composição do tráfego médio em três trechos desta pesquisa utilizada para análise no HDM 4

Carro de Passeio (CP)	72 %
Ônibus (ON)	8 %
Caminhão Leve (Cam.L)	8 %
Caminhão Médio (Cam.M)	7 %
Caminhão Pesado (Cam.P)	5%

Tabela 6.26 Características dos veículos utilizadas na análise dos três trechos desta pesquisa no HDM 4

	CP	**ON**	**Cam. L**	**Cam. M**	**Cam. P**
Nº de eixos	2	3	2	2	3
Nº de rodas	4	10	4	6	10
Tipo de Pneu	Radial	Diagonal	Diagonal	Diagonal	Diagonal
Peso de Operação	1,2	10	2,0	7,5	13
ESALF [(1)]	0	0,8	0,1	1,25	2,28
PCSE [(2)]	1	1,6	1,3	1,4	1,6

[(1)] *Equivalent Standard Axles Load Factor* = fator de equivalência de cargas.
[(2)] *Passenger Car Space Equivalent* = espaço equivalente padrão de um carro de passageiro.

Tabela 6.27 Custos unitários dos veículos utilizados na análise dos três trechos desta pesquisa no HDM 4 em US$

	CP	**ON**	**Cam. L**	**Cam. M**	**Cam. P**
Veículo novo	9.000	70.000	30.000	46.000	75.000
Troca de Pneus	60	350	300	300	300
Combustível p/ litro	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Óleo lubrificante p/litro	2	2	2	2	2
Manutenção p/hora	4,2	5,6	5,6	5,1	5,6
Tripulação p/ hora	0	8,9	8,9	8,9	8,9
Gastos gerais p/ano	400	800	800	700	800
Carga p/hora	0	0,10	0,4	0,20	0,1

6.5.1 Resultados e análise da evolução do IRI no trecho escolhido na CE 040

Na Tabela 6.28 são indicadas as estratégias de manutenção propostas para o trecho 040ECE0070D, com revestimento em CBUQ, com 50 mm de espessura, enquanto na

Figura 6.35 são mostradas as curvas de evolução do IRI em função das estratégias propostas para este trecho na CE 040.

Tabela 6.28 Estratégias de manutenção propostas para o trecho da CE 040

Rodovia	*Base Alternative*		MANUTEN A		MANUTEN B		MANUTEN C	
	Serviço	**Ano**	**Serviço**	**Ano**	**Serviço**	**Ano**	**Serviço**	**Ano**
CE 040 IRI_0 = 2,40	R (Manut. de Rotina)	2007-2009	R (Manut. de Rotina)	2007	R (Manut. de Rotina)	2007	R (Manut. de Rotina)	2007
	R (Manut. de Rotina)	2010	R (Manut. de Rotina)	2008-2010	R (Manut. de Rotina)	2008-2011	R (Manut. de Rotina)	2011
	R (Manut. de Rotina)	2011-2013	R + TB (Tapa-buraco) + Reforço de 50 mm	2011	R + TB (Tapa-buraco) + Reforço de 50 mm	2012	R + TB (Tapa-buraco) + Reforço de 50 mm	2013
	R + TB (Tapa-buraco)	2014	R (Manut. de Rotina)	2012-2014	R (Manut. de Rotina)	2013-2015	R (Manut. de Rotina)	2016
	R (Manut. de Rotina)	2015-2025	R (Manut. de Rotina)	2015-2025	R (Manut. de Rotina)	2016-2025	R (Manut. de Rotina)	2018-2025

Verifica-se na análise das estratégias para o trecho 040ECE0070D, Figura 6.35, que tanto a MANUTEN A quanto a MANUTEN B, são as melhores estratégias apesar de nesta última os serviços R + TB (Tapa-buraco) + Reforço de 50 mm, terem sido efetuados um pouco tarde. A postergação dos serviços, R + TB (Tapa-buraco) + Reforço de 50 mm, propostos na MANUTEN C para 2013, quando o valor do IRI estava próximo de 12, não surtiu efeito, apenas, manteve o valor do IRI, tornando assim inviável esta estratégia. Neste trecho foi efetuada também uma análise econômica, mostrada no item 6.6, onde se pode observar que a MANUTEN A e a MANUTEN B, são as melhores estratégias, o que não ocorre com a MANUTEN C.

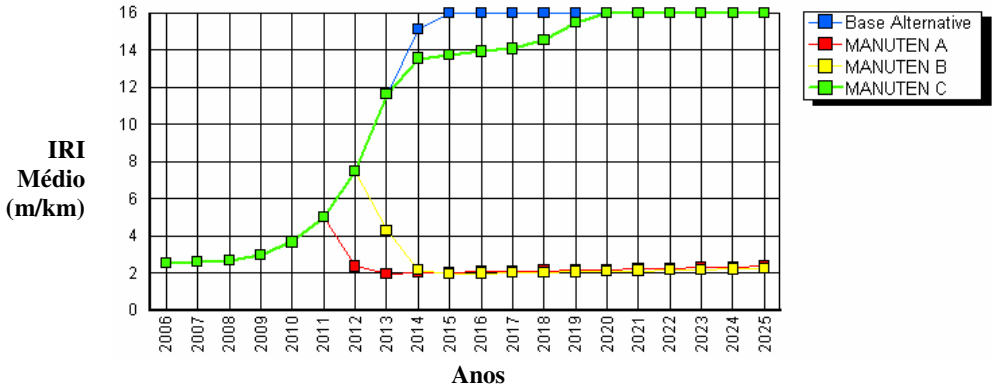


Figura 6.35 Curvas de evolução do IRI no trecho 040ECE0070D para as estratégias propostas na Tabela 6.27

6.5.2 Resultados e análise da evolução do IRI no trecho escolhido na CE 060

Na Tabela 6.29 são indicadas às estratégias de manutenção propostas para o trecho 060ECE0030D com revestimento em CBUQ, enquanto que na Figuras 6.36 são mostradas as curvas de evolução do IRI para as estratégias propostas para este trecho escolhido na CE 060.

Tabela 6.29 Estratégias de manutenção propostas para os trechos da CE 060

Rodovia	*Base Alternative*		MANUTEN A		MANUTEN B		MANUTEN C	
	Serviço	Ano	Serviço	Ano	Serviço	Ano	Serviço	Ano
CE 060 IRI_0 = 3,80	R (Manut. de Rotina)	2007	R (Manut. de Rotina)	2007	R (Manut. de Rotina)	2007	R (Manut. de Rotina)	2007-2014
	R (Manut. de Rotina)	2008-2010	R (Manut. de Rotina)	2008-2010	R (Manut. de Rotina)	2008	R (Manut. de Rotina)	2015
	R + TB (Tapa-buraco)	2011	R (Manut. de Rotina)	2011	R (Manut. de Rotina)	2009-2013	R + TB (Tapa-buraco) + Reforço de 50mm	2016
	R (Manut. de Rotina)	2012-2025	R + TB (Tapa-buraco) + Reforço de 50mm	2012	R + TB (Tapa-buraco) + Reforço de 50mm	2014	R (Manut. de Rotina)	2017-2025
			R (Manut. de Rotina)	2013-2025	R (Manut. de Rotina)	2015-2025		

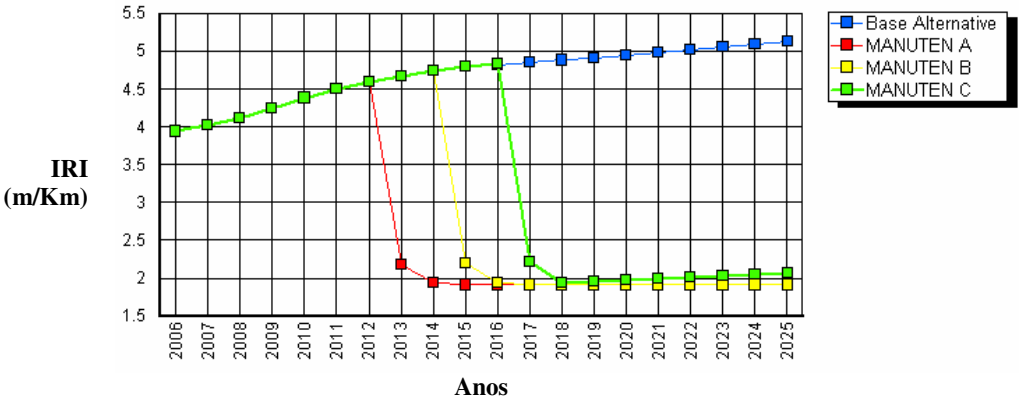


Figura 6.36 Curvas de evolução do IRI no trecho 060ECE0030D para as estratégias propostas na Tabela 6.28

Na análise das Curvas de evolução do IRI mostradas na Figura 6.36 para as estratégias propostas, percebe-se que, as três estratégias de manutenção são aceitáveis. Porém, adotando-se o critério instituído na Tabela 6.28, que estabelece que quando o IRI for

maior que cinco, o trecho necessita de um recapeamento, a MANUTEN C deve ser a melhor solução, inclusive quando se trabalha com restrições orçamentárias.

6.5.3. Resultados e análise da evolução do IRI no trecho escolhido na CE 085

Na Tabela 6.30 são indicadas as estratégias de manutenção propostas para o trecho 085ECE0050E com revestimento em TSD, enquanto que na Figura 6.37 são mostradas as curvas de evolução para as estratégias propostas para o trecho.

Tabela 6.30 Estratégias de manutenção propostas para o trecho da CE 085

Rodovia	***Base Alternative***		**MANUTEN A**		**MANUTEN B**		**MANUTEN C**	
	Serviço	**Ano**	**Serviço**	**Ano**	**Serviço**	**Ano**	**Serviço**	**Ano**
CE 085 IRI_0 = 4,70	R (Manut. de Rotina)	2007	R (Manut. de Rotina)	2007	R (Manut. de Rotina)	2007	R (Manut. de Rotina)	2007
	R (Manut. de Rotina)	2008-2009	R (Manut. de Rotina)	2008	R (Manut. de Rotina)	2008-2010	R (Manut. de Rotina)	2008-2010
	R (Manut. de Rotina)	2010	R + TB (Tapa-buraco) + Reforço de 50mm	2009	R + TB (Tapa-buraco) + Reforço de 50mm	2011	R (Manut. de Rotina)	2011
	R + TB (Tapa-buraco)	2011	R (Manut. de Rotina)	2010	R (Manut. de Rotina)	2012	R + TB (Tapa-buraco) + Reforço de 50mm	2013
	R (Manut. de Rotina)	2012-2025	R (Manut. de Rotina)	2011-2025	R (Manut. de Rotina)	2013-2025	R (Manut. de Rotina)	2014-2025

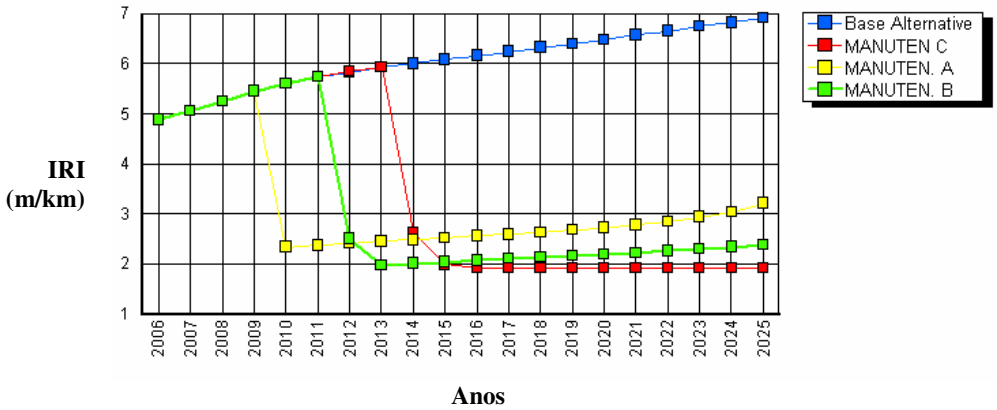


Figura 6.37 Curvas de evolução do IRI no trecho 085ECE0050E para as estratégias propostas na Tabela 6.29

Verifica-se, na análise das curvas de evolução do IRI, da Figura 6.37 que a estratégia proposta para a MANUTEN A deve ser a de melhor solução. Ao estabelecer os serviços de R + TB (Tapa-buraco) + Reforço de 50mm, para o ano de 2009, esta estratégia além

de ser a que melhor atende o critério estabelecido para intervenção em função do valor do IRI, deve proporcionar maior economia para o usuário. As demais estratégias postergaram a intervenção de recapeamento, devendo acarretar em maiores custos para o usuário.

A utilização do software HDM 4

6.6. Indicadores econômicos de um dos trechos deste estudo pelo HDM 4

Um SGP possibilita que se determine a forma mais eficiente de aplicação de recursos disponíveis, analisando as diversas alternativas de manutenção que respondam às necessidades dos usuários, dentro de um planejamento estratégico, garantindo o menor custo para o usuário e o maior Valor Presente Líquido (VPL). O HDM 4 é uma ferramenta de grande importância para a avaliação econômica de projetos ou trecho, por gerar relatórios com indicadores econômicos que permitem a escolha da alternativa que proporciona a aplicação mais eficaz destes recursos.

Nesta pesquisa, a título ilustrativo desta possibilidade de análise foi desenvolvido um estudo de caso de avaliação econômica em um dos trechos da RMF, no caso o 040ECE0070D, utilizando o HDM 4. As Tabelas 6.31 a 6.35 apresentam os relatórios com o resumo dos resultados para as mesmas estratégias de manutenção adotadas na análise de evolução do IRI, ou seja, *Base Alternative*, MANUTEN A, MANUTEN B e MANUTEN C.

Na análise destes resultados, foi utilizado o critério de decisão pelo Valor Presente Líquido (VPL). O VPL é calculado pela diferença entre os custos totais de transportes (CTT) da *base alternative*, tomada como referência, e da estratégia de manutenção analisada. Tomemos como exemplo a MANUTEN A. Neste caso, o VPL é igual a 13.417, correspondendo à diferença entre 60.155 (CTT para a base alternativa, Tabela 6.32) e 46.738 (CTT para a MANUTEN A, Tabela 6.33). Verifica-se na Tabela 6.31, que apresenta o resumo dos indicadores econômicos, que as estratégias MANUTEN A e MANUTEN B, apresentam os maiores valores do VPL, podendo ainda ser escolhida a MANUTEN A, como a melhor solução. Assim como na análise da evolução do IRI, neste trecho, a *base alternative* (do programa) e a MANUTEN C são as piores soluções na análise feita pelo VPL, neste caso.

Verifica-se também a assertiva acima, se analisarmos as Tabelas 6.32 a 6.35, que mostram os custos do órgão rodoviário e dos usuários para as estratégias acima citadas. A escolha da estratégia MANUTEN A ao invés da estratégia *base alternative*, proporciona uma economia de 13.574 nos custos totais dos usuários da rodovia (RUC), correspondente à diferença entre os valores 59.601 (RUC para a *base alternative*, Tabela 6.32) e 46.027 (RUC para a MANUTEN A, Tabela 6.33). A diferença dos valores do RUC para as estratégias base alternativa, Tabela 6.32, (59.601) e para a MANUTEN C, tabela 6.35, (58.281), igual a 1.320, é bem menor que aquela outra, comprovando, também pela avaliação econômica que a MANUTEN A é a melhor estratégia dentre as analisadas.

Como visto e demonstrado nestes exemplos de aplicação do HDM, este programa foi concebido como uma ferramenta para estimar custos comparativos e avaliações econômicas de diferentes opções de construção e manutenção, incluindo diferentes alternativas de período de análise, para um trecho específico ou para uma rede. Mas melhores análises podem ser feitas caso se adapte os modelos internos do mesmo.

Nos estudos para a melhoria do HDM para geração da versão 4 foram compilados resultados de aplicação das versões anteriores em aproximadamente 100 países com diferenças tecnológicas, climáticas e econômicas. Porém, como todos os cálculos são baseados nos modelos de desempenho a partir das condições atuais dos trechos analisados, a confiabilidade dos resultados depende da aplicabilidade dos modelos de previsão do comportamento para a situação específica do local de estudo.

Para que esta aplicabilidade dos modelos fique mais adequada, foram criados mecanismos de calibração dos modelos internos do programa da versão HDM 4 (*default*) e a forma de fazer esta adaptação está descrita no Volume 5 do Manual do HDM – Guia de Calibração e Adaptação.

De acordo com o Manual, para uma calibração mais simples podem ser ajustadas as seguintes informações: custos unitários, algumas características dos veículos representativos da frota, dados da análise econômica (taxas de desconto e período de análise), características do subleito, composição e taxas de crescimento do tráfego e tipo

de clima regional em função da precipitação anual, do índice de umidade de Thornthwaite e da temperatura do ar, como foi feito nesta pesquisa.

Para um nível intermediário de calibração são usados diretamente medidas das condições locais para verificar e ajustar a capacidade de previsão dos modelos de desempenho bem como dos custos e preços dos serviços e insumos.

Para um nível superior de calibração e adaptação dos modelos é necessário um estudo sistemático ao longo de um período adequado de acompanhamento regional dos parâmetros envolvidos nos modelos internos do HDM. Por exemplo, para revisão dos modelos de deterioração dos pavimentos o manual indica pelo menos 5 anos de acompanhamento sistemático, nos padrões definidos de experimento.

A continuação da presente pesquisa para a malha rodoviária do Ceará deve ter como meta a adaptação dos modelos de desempenho existentes no HDM 4 para os modelos gerados pela aplicação de Markov resultante desta tese bem como de outros modelos de acompanhamento sistemáticos dos levantamentos pelos critérios do SIGMA e do IRI com o equipamento laser. Assim, as análises locais poderão ser mais bem ajustadas à condição particular da rede e os cenários orçamentários também.

Tabela 6.31 Resumo dos indicadores econômicos

NOME DO ESTUDO (ESTRATÉGIA):	DESEMPENHO TRECHO RMF CE040 TESE DO SÉRGIO
DATA:	24/8/2006
MOEDA:	Milhões de Dólares
TAXA DE DESCONTO:	12%
SEÇÃO:	ANEL RODOVIÁRIO - ENTR. CE 251 (EUSÉBIO) D
CÓDIGO:	040ECE0070D
EXTENSÃO:	5,31 km

Alternativa	Valor Presente do Custo Total do Órgão (RAC)	Valor Presente do Custo do Capital do Órgão (CAP)	Acréscimo do Custo do Órgão (C)	Decréscimo do Custo do Usuário (B)	Custos Externos Líquidos (E)	Valor Presente Líquido (VPL = B + E - C)	VPL/RAC	VPL/CAP	Taxa Interna de Retorno
Base Alternative	0,554	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
MANUTEN A	0711	0,599	0,157	13,573	0,000	13,417	18,877	22,404	139,1
MANUTEN B	0,872	0,760	0,318	13,053	0,000	12,735	14,600	16,759	141,2
MANUTEN C	0,101	0,000	-0,453	1,319	0,000	1,772	17,549	Zero	Sem solução

Tabela 6.32 Custos do órgão rodoviário e dos usuários para a estratégia Base Alternativa

SEÇÃO: ANEL RODOVIÁRIO - ENTR. CE 251 (EUSÉBIO) D

CÓDIGO: 040ECE0070D

EXTENSÃO: 5,31 Km

Ano	Custos do Ógão Rodoviário (RAC)				Custos do Usuário da Rodovia (RUC)					Custos Externos Líquidos	Custo Total de Transporte (CTT)
	Capital	Recorrente	Especial	Total RAC	Operação de Veículos (MT)	Tempo de Viagem (MT)	Viagens e Operação (NMT)	Acidentes	Total RUC		
2006	0.000	0.000	0.000	0.000	4.410	0.261	0.000	0.000	4.671	0.000	4.671
2007	0.000	0.000	0.000	0.000	4.038	0.238	0.000	0.000	4.276	0.000	4.276
2008	0.000	0.012	0.000	0.012	3.698	0.218	0.000	0.000	3.916	0.000	3.928
2009	0.000	0.011	0.000	0.011	3.394	0.200	0.000	0.000	3.594	0.000	3.604
2010	0.000	0.009	0.000	0.009	3.171	0.183	0.000	0.000	3.354	0.000	3.364
2011	0.000	0.008	0.000	0.008	3.027	0.171	0.000	0.000	3.198	0.000	3.206
2012	0.000	0.008	0.000	0.008	2.971	0.185	0.000	0.000	3.156	0.000	3.164
2013	0.000	0.007	0.000	0.007	3.233	0.257	0.000	0.000	3.490	0.000	3.497
2014	0.000	0.464	0.000	0.464	3.435	0.305	0.000	0.000	3.741	0.000	4.204
2015	0.000	0.005	0.000	0.005	3.257	0.296	0.000	0.000	3.553	0.000	3.559
2016	0.000	0.005	0.000	0.005	2.985	0.271	0.000	0.000	3.256	0.000	3.260
2017	0.000	0.004	0.000	0.004	2.734	0.248	0.000	0.000	2.982	0.000	2.986
2018	4000	0.004	0.000	0.004	2.505	0.227	0.000	0.000	2.732	0.000	2.736
2019	0.000	0.003	0.000	0.003	2.294	0.208	0.000	0.000	2.503	0.000	2.506
2020	0.000	0.003	0.000	0.003	2.102	0.191	0.000	0.000	2.293	0.000	2.296
2021	0.000	0.003	0.000	0.003	1.926	0.175	0.000	0.000	2.101	0.000	2.103
2022	0.000	0.002	0.000	0.002	1.765	0.160	0.000	0.000	1.925	0.000	1.927
2023	0.000	0.002	0.000	0.002	1.617	0.147	0.000	0.000	1.764	0.000	1.766
2024	0.000	0.002	0.000	0.002	1.482	0.134	0.000	0.000	1.616	0.000	1.618
2025	0.000	0.002	0.000	0.002	1.358	0.123	0.000	0.000	1.481	0.000	1.483
Total:	**0.000**	**0.554**	**0.000**	**0.554**	**55.402**	**4.198**	**0.000**	**0.000**	**59.601**	**0.000**	**60.155**

Todos os custos são descontados de 12 %

Tabela 6.33 Custos do órgão rodoviário e dos usuários para a estratégia MANUTEN A

SEÇÃO: ANEL RODOVIÁRIO - ENTR. CE 251 (EUSÉBIO) D
CÓDIGO: 040ECE0070D
EXTENSÃO: 5,31 Km

Ano	Custos do Ógão Rodoviário (RAC)				Custos do Usuário da Rodovia (RUC)					Custos Externos Líquidos	Custo Total de Transporte (CTT)
	Capital	Recorrente	Especial	Total RAC	Operação de Veículos (MT)	Tempo de Viagem (MT)	Viagens e Operação (NMT)	Acidentes	Total RUC		
2006	0.000	0.000	0.000	0.000	4.410	0.261	0.000	0.000	4.671	0.000	4.671
2007	0.000	0.013	0.000	0.013	4.038	0.238	0.000	0.000	4.276	0.000	4.289
2008	0.000	0.012	0.000	0.012	3.698	0.218	0.000	0.000	3.916	0.000	3.928
2009	0.000	0.011	0.000	0.011	3.394	0.200	0.000	0.000	3.594	0.000	3.604
2010	0.000	0.009	0.000	0.009	3.171	0.183	0.000	0.000	3.354	0.000	3.364
2011	0.316	0.011	0.000	0.327	3.027	0.171	0.000	0.000	3.198	0.000	3.525
2012	0.282	0.008	0.000	0.290	2.591	0.153	0.000	0.000	2.744	0.000	3.035
2013	0.000	0.007	0.000	0.007	2.369	0.140	0.000	0.000	2.509	0.000	2.516
2014	0.000	0.006	0.000	0.006	2.168	0.128	0.000	0.000	2.297	0.000	2.303
2015	0.000	0.005	0.000	0.005	1.985	0.118	0.000	0.000	2.103	0.000	2.108
2016	0.000	0.005	0.000	0.005	1.817	0.108	0.000	0.000	1.925	0.000	1.930
2017	0.000	0.004	0.000	0.004	1.664	0.099	0.000	0.000	1.763	0.000	1.767
2018	0.000	0.004	0.000	0.004	1.523	0.090	0.000	0.000	1.614	0.000	1.618
2019	0.000	0.003	0.000	0.003	1.395	0.083	0.000	0.000	1.478	0.000	1 .481
2020	0.000	0.003	0.000	0.003	1.277	0.076	0.000	0.000	1.353	0.000	1.356
2021	0.000	0.003	0.000	0.003	1.169	0.069	0.000	0.000	1.239	0.000	1.242
2022	0.000	0.002	0.000	0.002	1.071	0.064	0.000	0.000	1.134	0.000	1.137
2023	0.000	0.002	0.000	0.002	0.980	0.058	0.000	0.000	1.039	0.000	1.041
2024	0.000	0.002	0.000	0.002	0.898	0.053	0.000	0.000	0.951	0.000	0.953
2025	0.000	0.002	0.000	0.002	0.822	0.049	0.000	0.000	0.871	0.000	0.873
Total:	**0.599**	**0.112**	**0.000**	**0.711**	**43.469**	**2.559**	**0.000**	**0.000**	**46.027**	**0.000**	**46.738**

Todos os custos são descontados de 12 %

Tabela 6.34 Custos do órgão rodoviário e dos usuários para a estratégia MANUTEN B

SEÇÃO: ANEL RODOVIÁRIO - ENTR. CE 251 (EUSÉBIO) D
CÓDIGO: 040ECE0070D
EXTENSÃO: 5,31 Km

Ano	Custos do Ógão Rodoviário (RAC)				Custos do Usuário da Rodovia (RUC)					Custos Externos Líquidos	Custo Total de Transporte (CTT)
	Capital	Recorrente	Especial	Total RAC	Operação de Veículos (MT)	Tempo de Viagem (MT)	Viagens e Operação (NMT)	Acidentes	Total RUC		
2006	0.000	0.000	0.000	0.000	4.410	0.261	0.000	0.000	4.671	0.000	4.671
2007	0.000	0.013	0.000	0.013	4.038	0.238	0.000	0.000	4.276	0.000	4.289
2008	0.000	0.012	0.000	0.012	3.698	0.218	0.000	0.000	3.916	0.000	3.928
2009	0.000	0.011	0.000	0.011	3.394	0.200	0.000	0.000	3.594	0.000	3.604
2010	0.000	0.009	0.000	0.009	3.171	0.183	0.000	0.000	3.354	0.000	3.364
2011	0.000	0.008	0.000	0.008	3.027	0.171	0.000	0.000	3.198	0.000	3.206
2012	0.282	0.010	0.000	0.293	2.971	0.185	0.000	0.000	3.156	0.000	3.449
2013	0.252	0.007	0.000	0.259	2.480	0.141	0.000	0.000	2.621	0.000	2.880
2014	0.225	0.006	0.000	0.231	2.170	0.128	0.000	0.000	2.298	0.000	2.529
2015	0.000	0.005	0.000	0.005	1.985	0.118	0.000	0.000	2.102	0.000	2.108
2016	0.000	0.005	0.000	0.005	1.817	0.108	0.000	0.000	1.925	0.000	1.929
2017	0.000	0.004	0.000	0.004	1.663	0.099	0.000	0.000	1.762	0.000	1.766
2018	0.000	0.004	0.000	0.004	1.523	0.090	0.000	0.000	1.613	0.000	1.617
2019	0.000	0.003	0.000	0.003	1.394	0.083	0.000	0.000	1.477	0.000	1 .481
2020	0.000	0.003	0.000	0.003	1.277	0.076	0.000	0.000	1.352	0.000	1.356
2021	0.000	0.003	0.000	0.003	1.169	0.069	0.000	0.000	1.238	0.000	1.241
2022	0.000	0.002	0.000	0.002	1.070	0.064	0.000	0.000	1.134	0.000	1.136
2023	0.000	0.002	0.000	0.002	0.980	0.058	0.000	0.000	1.038	0.000	1.041
2024	0.000	0.002	0.000	0.002	0.897	0.053	0.000	0.000	0.951	0.000	0.953
2025	0.000	0.002	0.000	0.002	0.822	0.049	0.000	0.000	0.871	0.000	0.873
Total:	**0.760**	**0.112**	**0.000**	**0.872**	**43.956**	**2.592**	**0.000**	**0.000**	**46.548**	**0.000**	**47.420**

Todos os custos são descontados de 12 %

Tabela 6.35 Custos do órgão rodoviário e dos usuários para a estratégia MANUTEN C

SEÇÃO: ANEL RODOVIÁRIO - ENTR. CE 251 (EUSÉBIO) D
CÓDIGO: 040ECE0070D
EXTENSÃO: 5,31 Km

Ano	Custos do Ógão Rodoviário (RAC)				Custos do Usuário da Rodovia (RUC)					Custos Externos Líquidos	Custo Total de Transporte
	Capital	Recorrente	Especial	Total RAC	Operação de Veículos (MT)	Tempo de Viagem (MT)	Viagens e Operação (NMT)	Acidentes	Total RUC		
2006	0.000	0.000	0.000	0.000	4.410	0.261	0.000	0.000	4.671	0.000	4.671
2007	0.000	0.000	0.000	0.000	4.038	0.238	0.000	0.000	4.276	0.000	4.276
2008	0.000	0.012	0.000	0.012	3.698	0.218	0.000	0.000	3.916	0.000	3.928
2009	0.000	0.011	0.000	0.011	3.394	0.200	0.000	0.000	3.594	0.000	3.604
2010	0.000	0.009	0.000	0.009	3.171	0.183	0.000	0.000	3.354	0.000	3.364
2011	0.000	0.008	0.000	0.008	3.027	0.171	0.000	0.000	3.198	0.000	3.206
2012	0.000	0.008	0.000	0.008	2.971	0.185	0.000	0.000	3.156	0.000	3.164
2013	0.000	0.011	0.000	0.011	3.233	0.257	0.000	0.000	3.490	0.000	3.502
2014	0.000	0.006	0.000	0.006	3.216	0.273	0.000	0.000	3.490	0.000	3.496
2015	0.000	0.005	0.000	0.005	2.971	0.254	0.000	0.000	3.225	0.000	3.230
2016	0.000	0.005	0.000	0.005	2.741	0.236	0.000	0.000	2.976	0.000	2.981
2017	0.000	0.004	0.000	0.004	2.526	0.218	0.000	0.000	2.744	0.000	2.749
2018	0.000	0.004	0.000	0.004	2.359	0.206	0.000	0.000	2.565	0.000	2.569
2019	0.000	0.003	0.000	0.003	2.245	0.201	0.000	0.000	2.446	0.000	2.450
2020	0.000	0.003	0.000	0.003	2.102	0.191	0.000	0.000	2.293	0.000	2.296
2021	0.000	0.003	0.000	0.003	1.926	0.175	0.000	0.000	2.101	0.000	2.103
2022	0.000	0.002	0.000	0.002	1.765	0.160	0.000	0.000	1.925	0.000	1.927
2023	0.000	0.002	0.000	0.002	1.617	0.147	0.000	0.000	1.764	0.000	1.766
2024	0.000	0.002	0.000	0.002	1 .482	0.134	0.000	0.000	1.616	0.000	1.618
2025	0.000	0.002	0.000	0.002	1.358	0.123	0.000	0.000	1.481	0.000	1 .483
Total:	**0.000**	**0.101**	**0.000**	**0.101**	**54.250**	**4.031**	**0.000**	**0.000**	**58.281**	**0.000**	**58.382**

Todos os custos são descontados de 12 %

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo central desta pesquisa foi desenvolver modelos de previsão de desempenho de pavimentos, para um Sistema de Gestão de rodovias estaduais do Ceará, considerando desta malha, 72 trechos da RMF. Deve ser destacado que esses modelos também podem ser aplicados em outros segmentos que a eles se assemelhem, notadamente na região nordeste do Brasil, por refletirem às condições climáticas, os volumes de tráfego, além de outras características pertinentes, visto que foram obtidos modelos que irão proporcionar maior acuidade na avaliação do desempenho destes pavimentos.

Para tanto, foram estabelecidos os vetores estados inicial dos trechos considerando a situação atual do pavimento e utilizadas as matrizes de probabilidade de transição de Markov para gerar os modelos probabilísticos e assim determinar a evolução do Índice de Condição do Pavimento (ICP). Para os modelos estatísticos foram efetuados levantamentos de defeitos/severidade pelo LVC, medidas de IRI e de ATR utilizando o perfilômetro inercial a laser, coletados dados complementares de deflexão no DERT-CE e também utilizados os valores do ICP. Nos modelos estatísticos foram estabelecidas equações de regressão utilizando a Análise da Variância (ANOVA), por meio dos programas *Microsoft Office Excel* e SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*).

Como exemplo de aplicação dos conceitos, o software HDM 4 foi usado para calcular o número estrutural corrigido a partir dos dados de deflexão coletados e para analisar, a partir das estratégias de manutenção, a evolução da irregularidade longitudinal em alguns trechos escolhidos. Também foi analisado pelo HDM 4, em um estudo de caso, o resumo dos indicadores econômicos de um dos trechos desta pesquisa.

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões, as observações finais, assim como recomendações para futuras pesquisas.

7.1 Conclusões

As principais conclusões desta pesquisa foram:

1. Esta pesquisa mostrou como desenvolver modelos probabilísticos de previsão de desempenho de pavimentos sem dispor de dados históricos de avaliação da condição dos pavimentos, utilizando-se apenas os dados obtidos através de questionários da condição atual e as matrizes de probabilidade de transição estabelecidas pelo processo de Markov para os três tipos de revestimento.
2. Os comportamentos da deterioração dos pavimentos em função do tempo, mostrados nos modelos probabilísticos para os três tipos de revestimento, TSD, AAUQ e CBUQ, estão relacionados com o volume de tráfego e em conseqüência deste, com as matrizes de probabilidade de transição estabelecidas com base na opinião de especialistas.
3. O ICP utilizado como variável independente nos modelos estatísticos mostrou ser o parâmetro de maior correlação para a previsão da evolução da irregularidade longitudinal.
4. Verifica-se na análise das equações que correlacionam os resultados do IRI nas trilhas interna e externa, IRI_{int} x IRI_{ext}, obtidos com a localização dos sensores na posição normal, altos valores do coeficiente de determinação (R^2). Observa-se também que à medida que o valor do IRI vai aumentando, se torna maior a diferença de valores do IRI entre as trilhas, preponderando os maiores valores na trilha externa ou do lado direito. Esta conclusão concorda com resultados encontrados na literatura por outros pesquisadores.
5. No modelo correlacionando os resultados do IRI médio, obtidos com a localização dos três sensores no lado direito (LD) e no lado esquerdo (LE), também com um alto valor do R^2 (0,9257), observa-se a mesma tendência dos modelos anteriormente citados. Preponderam os maiores valores do IRI médio para a disposição dos três sensores no lado direito, quando estes valores vão aumentando.
6. No modelo de correlação entre os valores do IRI_{int} com os sensores na posição normal e os valores do IRI_{int} com os sensores no lado esquerdo, que apresenta alto valor no coeficiente de determinação (R^2 = 0,8967), constata-se que para as medições do IRI_{int} não houve influência da utilização da haste de 1,40 m, assim como do espaçamento entre os sensores.

7. O ICP utilizado como variável independente nos modelos estatísticos mostrou ser o parâmetro de maior correlação para a previsão da evolução da irregularidade longitudinal.
8. A concordância entre os valores de evolução do IRI em função do ICP obtidos com o modelo desenvolvido nesta pesquisa, com o modelo desenvolvido no estudo de DEWAN e SMITH, (2002), mostrou ser bastante boa. Pode-se admitir que pelo menos para um modelo inicial de previsão de um sistema de gerência de pavimentos (SGP) que não possa dispor ainda de séries históricas, a previsão da condição do pavimento utilizando o processo de Markov, a partir de opiniões de técnicos bem experientes e conhecedores da malha analisada, pode ser uma alternativa viável.
9. Constatou-se que a forte correlação entre o IRI medido com o perfilômetro a laser e os valores da variável explicativa, o ICP P(o), estimados pelo processo de Markov, independe das disposições dos sensores situados na posição normal, no lado direito ou no lado esquerdo.
10. Verificou-se que não há correlação entre os valores do IRI e do ATR medidos com o perfilômetro inercial a laser. Mesmo que se tivesse obtido uma correlação razoável entre o IRI e o ATR, seria temerário generalizá-la, porque esses problemas em um pavimento podem não acontecer juntos e sim de forma isolada.
11. Nas análises das correlações entre o IRI e os defeitos/severidades medidos no levantamento visual contínuo (LVC), observou-se que não há modelo de correlação entre o IRI e a trinca de bloco (TB). Também foi constatado que são baixíssimos os valores dos coeficientes de determinação (R^2) nos modelos entre o IRI e o afundamento (AFUND) e o IRI e o desgaste (DES), não devendo estes modelos ser usados. Verificou-se também que há uma boa correlação nos modelos entre o IRI e a trinca de fadiga (TF) e entre o IRI e o remendo (REM).
12. Na determinação dos modelos de regressão múltipla que correlaciona o IRI com o ICP, a deflexão (DEF), a trinca de fadiga (TF) e o número estrutural corrigido (NEC), foi observado que apesar de ser mais forte a correlação entre o IRI e o ICP, os outros parâmetros fornecem uma boa contribuição a estes modelos. Portanto, estes modelos podem ser também uma alternativa

viável para uma gerência de pavimentos em nível de rede por relacionar os aspectos funcionais com os estruturais. Foi tentado introduzir outras variáveis a estes modelos, porém, a análise estatística indicou que elas pouco ou quase nada trariam de contribuição para os modelos.

7.2 Observações Finais

1. A técnica adotada para a obtenção dos valores da irregularidade longitudinal e dos afundamentos de trilha de roda com o uso do perfilômetro inercial a laser foi mostrada no capítulo 5. Foi utilizado o Software *Ciberlogger* para coleta dos dados e para a determinação dos perfis longitudinais dos pavimentos, e o Software *Cibershell* para o cálculo do IRI.
2. Observou-se a repetibilidade e a precisão dos resultados apresentados pelo perfilômetro inercial a laser, conforme se pode verificar quando da checagem do equipamento efetuado em rodovias do Paraná, e nos valores do IRI, com as três disposições dos sensores efetuadas nesta pesquisa. Os pequenos valores do desvio padrão das 8 medidas de cada trecho, comprovam esta assertiva.
3. Constatou-se que as variações na velocidade de operação do veículo não afetam as medições do IRI, desde que estas oscilem entre 30 e 110 km/h.
4. Deve ser evitado o levantamento com o perfilômetro a laser entre 11:00 h e 14:00 h, principalmente nos trechos em TSD. A luz solar causa reflexos nos sensores que podem afetar os resultados.
5. Evitar fazer levantamento com o perfilômetro a laser quando o pavimento estiver molhado.
6. Procurar fazer com certa freqüência, a verificação de sujeira nos visores dos *laser.*
7. Foram descritos os procedimentos adotados neste estudo para efetuar o levantamento visual contínuo – LVC, capítulo 5, para quantificar os defeitos/severidades e para determinar a porcentagem do defeito padrão.
8. O software HDM 4 mostrou ser uma importante ferramenta que permite que se faça uma avaliação técnica da previsão de evolução da irregularidade longitudinal nos trechos em função das estratégias de manutenção adotadas para

um determinado projeto ou trecho, auxiliando no planejamento destas intervenções.

9. O HDM 4 é uma ferramenta de grande importância para a avaliação econômica de projetos ou trechos. Ao gerar relatórios com indicadores econômicos, ele permite que se determine a forma mais eficiente de aplicação dos recursos disponíveis, analisando as diversas alternativas de manutenção que respondam às necessidades dos usuários, dentro de um planejamento estratégico, garantindo o menor custo para o usuário e o maior Valor Presente Líquido (VPL).

7.3 Recomendações para Futuras Pesquisas

Os modelos de previsão de desempenho de pavimentos, utilizando-se dados de irregularidade longitudinal medidos com equipamento tipo perfilômetro inercial a laser, dados do LVC, de DEF, de NEC e/ou o processo de Markov, ainda não são utilizados com abrangência nos Sistemas de Gerências de Pavimentos (SGP) da região Nordeste, apesar de sua maior difusão na região Sul. Para ajustes dos modelos desenvolvidos nesta pesquisa ou para a geração de outros modelos de desempenho de pavimentos se faz necessário que uma série de outros fatores seja pesquisada de forma a enriquecer os aspectos abordados neste estudo, com o objetivo de dar subsídios à propagação da utilização destas importantes ferramentas. As seguintes pesquisas são recomendadas, algumas também de interesse geral:

1. Elaboração de uma nova metodologia para coletar dados provenientes de especialistas, para determinar a evolução da deterioração dos pavimentos em função do ICP, considerando mais de uma matriz de probabilidade de transição por revestimento.
2. Deve ser implantado nos Sistemas de Gestão um programa de pesagem de eixos de veículos, se possível, empregando balanças móveis que possibilitarão a avaliação de um maior número de pontos. Este programa deve ser acompanhado de contagens volumétricas classificatórias para permitir uma definição mais apurada e dar mais confiabilidade na determinação dos fatores de veículos e do número de operações do eixo padrão.
3. A criação e/ou ampliação de bancos de dados nos SGPs que permita a obtenção de informações com o monitoramento contínuo dos valores de IRI medidos com o perfilômetro a laser, das deflexões medidas com o FWD ou Viga Benkelman, dos

defeitos/severidades determinados no LVC e os dados provenientes de opinião de especialistas para obtenção dos valores do ICP. Estes valores coletados seriam de grande utilidade para estabelecer novos modelos de previsão de desempenho e para proceder aos devidos ajustes.

4. Como sugestão desta pesquisa em função dos resultados apresentados, recomenda-se que os Sistemas de Gestão nos próximos levantamentos visuais contínuos (LVC) ao invés de considerar isoladamente trinca de fadiga (TF) e trinca de bloco (TB), esses defeitos sejam agrupados, ou seja, devem ser considerados TF + TB, medindo-se assim toda a extensão trincada. Esta recomendação deve tornar o levantamento mais prático e mais confiável.
5. Realizar estudos de ajuste de outros modelos de previsão de desempenho, de modo a confrontar os resultados com os obtidos nesta pesquisa e determinar qual modelo de desempenho ajustado será mais bem adequado a cada tipo de pavimento e a condição de solicitação do tráfego.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHO, 1962, "The AASHO Road Test: Report 5" – *Pavement research – Special Report 61 E.* American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.

AASHTO, 1986, "Guide for Design of Pavement Structures". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.

AASHTO, 1990, "Guide for Design Management Systems". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.

AASHTO, 1993, "Guide for Design of Pavement Structures". American Association of the State Highway and transportation Officials, Washington DC.

ABAYNAYAKA, S.W., MOROSIUK G. & HIDE H., 1977. "Prediction of road construction and vehicle operating costs in developing countries". In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 62 (Part 1), 419-446.

AB'SÁBER, A. N., 1969, Participação das Superfícies Aplainadas do Nordeste Brasileiro.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM E-867-82A., 1982, Standard Definition of Terms Relating to Traveled Surface Characteristics. In: *Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia,* v. 01.05.

ARCHONDO-CALLAO, R. S., 1994, *HDM Manager Version 2.1 – Report TWU 12*. EUA: Transport Division, The World Bank, 1994. http://www-wds.worldbank.org/ [Acesso em 10 de abril de 2005].

ARCHONDO-CALLAO, R. S. & PUROHIT, R., 1989, "HDM-PC: user's guide. The Highway Design and Maintenance Standards Series". Washington DC: The World Bank.

ARCHONDO-CALLAO, R. S., 1999, "Typical Unpaved Roads Roughness Predicted by the HDM-III Model". Infrastructure Notes - Transport, Water and Urban Development - Infrastructure Notes. The World Bank - Transport No RT-1, 1999. http://www.worldbank.org/transport/publicat/td-rt1.pdf.

ASTEF, 2001, Pesagem de Veículos de Carga no Estado do Ceará. Relatório Final.

BARROSO, S.H.A., 2002, *Estudos de Solos da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação na Engenharia Rodoviária*. Tese de D.Sc., EESC/USP, São Carlos, SP.

BAUSANO, J.P., CHATTI, K. e WILLIAMS, R. C., 2004, "Reliability-Based use of PMS Data for Determining The life Expectancy of Preventive Maintenance Fixes for Asphalt Surfaces Pavements". Transportation Research Board, 83rd Annual Meeting Washington, DC.

BENEVIDES, S.A.S., 2000, *Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos: Empírico do DNER e da Resiliência da COPPE/UFRJ em Rodovias do Estado do Ceará*. Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BENEVIDES, S.A. S., CHAVES, F. J, MOTTA, L. M. G. et al., 2004, "Análise do Comportamento da Malha Rodoviária do Estado do Ceará sob Condições de Restrição Orçamentária". In: *35ª Reunião Anual de Pavimentação*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BENNETT, C.R., 1998, "Evaluation of a High Speed Transverse Profile Logger". In: *4th International Conference on Managing Pavements*, South Africa.

BERNUCCI, L. L. B., 1995, *Considerações Sobre o Dimensionamento de Pavimentos Utilizando Solos Lateríticos Para Rodovias de Baixo Volume de Tráfego*. Tese de D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

BERTOLLO S. A. M. & FERNANDES JÚNIOR, J. L., 1997, "Métodos Estocásticos para Previsão de Desempenho e sua Utilização em Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos". In: *Anais XI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET,* v. 3, p.p. 357-369.

BEZERRA, E. C., BEZERRA, J. E. G. & MENDES, M. de F. S., 1997, "Precipitações" In: *Atlas do Ceará*. Secretaria de Planejamento e Coordenação (SEPLAN / IPLANCE). pp. 22 – 23. Fortaleza, Ceará.

BOLIVAR, O.G. & ACHÚTEGUI, F., 1998, "Development of Tools for PMS in Spanish State Road Network". In: *4th International Conference on Managing Pavements*, South Africa.

BRANDÃO, R. L., 1998, "Diagnóstico Geoambiental e os Principais Problemas de Ocupação do Meio Físico da Região Metropolitana de Fortaleza". *Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Projeto SINFOR*. Fortaleza - Ceará, 85 p.

BUTT, A.A., SHAKIN M.Y., FEIGAN K.J. et al., 1988, "Pavement Performance Prediction Model Using the Markov Process**"**. In: *TRR 1123, Transportation Research Board*, Washington, DC.

BUTT, A.A., 1991, *Application of Markov Process to Pavement Management Systems at the Network level*. Ph. D. Thesis, University of Illinois.

CAMPOS, A. C. R., 2004, "*Métodos de Previsão de Desempenho de Irregularidade Longitudinal Para Pavimentos Asfálticos : Aplicação e Proposição de Critérios de Ajuste*". Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo.

CANADIAN GOOD ROAD ASSOCIATION, 1965, "A Guide to the Structural Design of Flexible and Rigid Pavement". Ottawa, Canada.

CANADIAN STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM AND UNIVERSITY OF WATERLOO. *The Effect of Initial Pavement Smoothness on Long Term Roughness Progression: Some Findings from C-LTPP and US-LTPP STUDIES*. Ottawa, Canada.

CARDOSO, S. H., 1992, "Avaliação não Destrutiva de Pavimentos de Aeroportos – A Experiência Brasileira". *Seminário de Manutenção de Aeroportos*, OACI/DIRENG/INFRAERO.

CAREY JR., W.N. e IRICK, P.E., 1960, "The Pavement Serviciability Performance Concept". In: *Highway Research Board* – Buletin 250, p.40-58.

CASSANIGA, J. L. e MACHADO FILHO, P. R., 2002, "Utilização do Merlin no Controle da Condição de Conforto de Pavimentos". In: *Anais do 16º IBP*, Rio de Janeiro, RJ.

CASTRO, J. W. Relatório Técnico "Loteamento Praia de Canoa Quebrada". *Dep. Rec. Naturais*, 1985.

CD - ROM – HDM, 2004, Manual do Usuário do Programa HDM 4, CD de instalação do programa.

CHAVES, F.J., 2000, *Caracterização Geotécnica de Solos da Formação Barreiras da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação em Obras Rodoviárias*. Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CHAVES, F.J., MOTTA, L. M. G. e BENEVIDES, S.A. S., 2004, "Revestimento com Tratamento Superficial Simples em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego". In: *17° Encontro de Asfalto, IBP*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CHEN, J.S. e RAZA, D., 1998, Network Level Pavement Maintenance in Pakistan**.** In**:** *4th International Conference on Managing Pavements*, South Africa.

CIBERMÉTRICA, 2005, Manual de Instalação e Operação do Perfilômetro Laser para Pavimentos.

COLARES, J. Q. S., 1996, *Mapeamento Geotécnico Preliminar da Região Metropolitana de Fortaleza Escala 1: 100.000.* Tese M.Sc., Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo.

COPPE, 1988, "Procedimentos para Execução de Ensaios com Carregamento Repetido (Solos, Britas, Misturas Betuminosas e Misturas Cimentadas)". *Setor de Mecânica dos Pavimentos, Laboratório de Geotecnia* , COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

CRRI, 1982, "Road User Cost Study in India".

DERT, 2003, "Plano de Conservação e Manutenção". *Relatório Interno*, Fortaleza/Ceará.

DEWAN, S. A. e SMITH, R. E., 2002, "Estimating IRI from Pavement Distress to Calculate Vehicle Operate Costs for the Cities and Counties of San Francisco Bay Area". In: *Transportation Research Board, 81nd Annual Meeting*, Washington, DC.

DNER/MT, 1976, "Classificação Climática de Wladimir Koppen". *Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.* Reimpressão. Rio de Janeiro, 3 p.

DNER, 1998, "Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos". IPR/DNER/ABNT Publ. 704, 1 ed. Rio de janeiro, 243 p.

DNER-ME 24/94, 1994, Determinação das Deflexões pela viga Benkelman. *Norma Rodoviária*, Brasil.

DNER-PRO 175/94, 1994, Aferição da viga Benkelman. *Norma Rodoviária*, Brasil.

DNER-ME 061/94, 1994, Delineamento da Linha de Influência Longitudinal da Bacia de Deformação por intermédio da viga Benkelman, *Norma Rodoviária*, Brasil.

DNER-PRO 010/79, PRO 011/79, Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis, Procedimentos A e B, *Norma Rodoviária*, Brasil.

DNER-PRO 159/85, Projeto de restauração de pavimentos flexíveis e semi-rígidos, *Norma Rodoviária,* Brasil.

DNER-PRO 269/94, Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV, *Norma Rodoviária,* Brasil.

DNER-PRO 164/94, Calibração e controle de sistemas medidores de irregularidade de superfície de pavimento (Sistemas Integradores IPR/USP e Maysmeter), *Norma Rodoviária,* Brasil.

DNER-ES 173/86, Método de Nível e Mira para Calibração de sistemas Medidores de irregularidades Tipo Resposta, *Norma Rodoviária,* Brasil.

DNER-PRO 182/94, Medição de irregularidade de superfície de pavimento com sistemas integradores IPR/USP e Maysmeter, *Norma Rodoviária,* Brasil.

DNER-PRO 229/94, Manutenção de sistemas medidores de irregularidade de superfície de pavimento - Integrador IPR/USP e Maysmeter, *Norma Rodoviária,* Brasil.

DNIT-005/2003-TER, Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Terminologia. *Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias*, Rio de Janeiro /RJ.

DNIT-006/2003 – PRO, Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Procedimento. *Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias*, Rio de Janeiro /RJ.

DNIT-007/2003 – PRO, Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos. Procedimento. *Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes – Instituto de Pesquisas Rodoviárias* - Rio de Janeiro /RJ.

DNIT-008/2003 – PRO, Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Procedimento. *Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes – Instituto de Pesquisas Rodoviárias* - Rio de Janeiro /RJ.

DNIT-009/2003 – PRO, Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Procedimento. *Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes –Instituto de Pesquisas Rodoviárias,* Rio de Janeiro /RJ.

DNIT, 2004, Assessoria Técnica na Área de Avaliação de Desempenho de Pavimentos Típicos Brasileiros. In: *Manual do Usuário*, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa/Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ.

DOMINGUES, F.A.A., 1993a, "Avaliação de Pavimentos: Construção de índice de Defeitos". In: *27ª Reunião Anual de Pavimentação*, Teresina, Piauí.

DOMINGUES, F.A.A., 1993b, "Sobre a gerência de pavimentos e o uso do modelo HDM – III"; In: *27ª Reunião Anual de Pavimentação*, Teresina, Piauí.

DOMINGUES, F.A.A., 1993c, *Manual para Identificação de Defeitos de Revestimentos Asfálticos – MID*, São Paulo, SP – 87 p.

DOMINGUES, F.A.A., 2003, "Especificações do equipamento medidor de irregularidade do IPR/USP". São Paulo, SP.

DOMINGUES, F. A. A. e BOTTURA, J., 1998, "Influência das geometrias horizontal e vertical na reprodutibilidade da referência de irregularidade através de sistemas medidores de irregularidade rodoviária tipo resposta – SMIRTR". In: *31ª Reunião Anual de Pavimentação,* Associação Brasileira de Pavimentação, São Paulo.

DOWN, C. G. & STOCKS, J., 1977, Environmental Impact of Mining. *Applied Science Publishers.*

DUARTE, J.C., SILVA, P.D.E.A. & FABRÍCIO J.M., 1996, "Correlação entre Deflexões Características em Pavimentos Flexíveis Medidos com a Viga Benkelman e

com o FWD – Falling Weight Deflectometer". In: *30ª reunião Anual de Pavimentação, ABPv*, Salvador, Bahia.

DYNATEST INTERNATIONAL. *Dynatest FWD / HWD Test Systems.* http://www.dynatest.com/hardware/fwd_hwd.htm. [Acesso em 23 de abril de 2.005].

ENGEFOTO, 2002, Relatório Final e Manual de Levantamentos de Campo. Curitiba, PR. CD – Rom.

ENGEVIAS, 2006, Relatório Final, Fortaleza, CE.

FARIAS, M. M. & SOUZA, R. O., 2002, "Irregularidade Longitudinal e sua Influência na Avaliação Funcional de Pavimentos". In: *VII Encontro Nacional de Conservação Rodoviária*, Vitória, ES. CD – Rom.

FHWA, 1989, "Road Surface Management for Local Governments". Course Workbook. U. S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Texas, USA.

FERNANDES JÚNIOR, J. L., 1997, "Curso de Atualização em Sistemas de Gerência de Transportes". *Material Didático, São Carlos*, Departamento de Transportes, EESC, USP.

FERNANDES JÚNIOR, J.L., ODA, S. & ZERBINI, J.L., 2003, "Defeitos e Atividades de Manutenção e Reabilitação em Pavimentos Asfálticos". *Material Didático, São Carlos*. Departamento de Transportes, EESC, USP.

GEIPOT, 1981, "Pesquisa de Inter-Relacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias (PICR)". *Relatório final 12 volumes*, Brasil.

GEIPOT, 1981, "Research on the interrelationships between costs of highway construction, maintenance and utilisation (PICR)". *Final report, 12 volumes*, Brazil.

GEIPOT, 2001, *Anuário Estatístico dos Transportes.* Ed. 2001, Rio de Janeiro. http://www.geipot.com.br [Acesso em 25 de abril de 2005].

GOGUEL, J., 1980, Geologie de I'environnement. Col Ecologie Apliquée et Sciences de I'environnement.

HAAS, R. & HUDSON, W. R., 1978, *Pavement Management Systems.* EUA: McGraw-Hill.

HAAS, R., HUDSON, W.R. & ZANIEWSKIJ, J., 1994, *Modern Pavement Management*, Malabar/Florida, Krieger Publishing Company.

HAJEK, J.J., MUSGROVE, G. & KAZMIEROWSKI, T. J., 1998, "Measurement, Management and Utilization of Rutting Data". In: *4th International Conference on Managing Pavements*, South Africa.

HICKS, R. G.; MOULTHROP, J.S. & DALEIDEN, J., 1999, "Selecting a Preventive Maintenance Treatment for Flexible Pavements". In: *Transportation Research Record 1680*, Washington, DC.

HOFFMAN, M. S. & THOMPSON, M. R., 1982, "Comparative Study of Selected Nondestructive Testing Devices". In: *Transportation Research Record 1311*, Washington, DC.

HUDSON, W.R., HAAS, R. & UDDIN, W., 1997, Infrastructure Management; McGraw-Hill Companies; New York / USA;

IBGE, 1977, "Geografia do Brasil". Vol. 1, 2, 3, 4 e 5.

IPLANCE, 1997, Atlas do Ceará.

KARAN, M.A., AL-KULAIB, A. A. e HAAS, R., 1998, "Meeting the Challenge of Integrating a Pavement Management System with Total Infrastructure Management". In: *4th International Conference on Managing Pavements*, South Africa.

KARAMIHAS, S., 2004, "The 2004 FHWA Profiler Round-Up". University of Michigan Transportation Research Institute, UMTRI.

KERALI, H. R., ROBINSON, R. & PATERSON, W. D. O., 1998a, "Role of the New HDM-4 In Highway Management". In: *4th International Conference on Managing Pavements*, South Africa.

KERALI, H. R., ODOKI, J.B., WIGHTMAN, D.C., et al., 1998b, "Structure of New Highway Development ansd Management TOOLS (HDM)". In: *4th International Conference on Managing Pavements*, South Africa.

KHATTAK, M.J. e ALRASHIDI, M., 2004, "Evaluation of Maintenence Treatments of Flexible Pavements Using LTPP Data". In: *Transportation Research Board 83th Annual Meeting*, Washington, D.C.

KLEIN, F.C., PARREIRA, A.P. & FERNANDES JR, J.L., 2006, "Avaliação dos custos de operação dos veículos e do tempo de viagem em função da geometria das rodovias". In: *CD XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Recife, PE.

KSAIBATI, K., McNAMARA, R. & ARMAGHANI, J., 1998, "A Comparison of Roughness Measurement from Laser and Ultrasonic Road Profilers". In: *Research Report FL/DOT/SMO/98-425*, STATE OF FLORIDA.

KUO, S.S., HESHAM, S.M, LORRIE, L.H, et al., "Development Of Flexible Pavement Performance Prediction Model Based on Pavement Data". In: *Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting Washington*, DC.

KULKARNI, R.B. & MILLER, P.E., 2003, "Pavement Management Sistem: Past, Present, and Future". In: *Transportation Research Board 82nd Annual Meeting* Washington, D.C.

LAWRENSE, D. R., 1973, Concepts et Methodes de Travail em Paleocologie. Ann. Soc. Geol. Belg.

LEE, D., CHATTI, K. & BALLADI, G. Y., 2001, "Development of Roughness Thresholds for Preventive Maintenance of Pavements Using PMS Distress and Ride Quality Data". In: *Transportation Research Board 80th Annual Meeting*, Washington, D.C.

LEPERT, P. & JOUBERT, P., 1998, "Recent Developments in the Pavement Management System in France". In: *4th International Conference on Managing Pavements,* South Africa.

LERCHE, R.L., 2002, *Previsão de Irregularidade Pós-Recape em Rodovias do RS: Ajuste do Modelo HDM-4*. Tese de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LTPP, 2002a, "Data Analysis: Effectiveness of Maintenance and Rehabilitations Options". In: *Transportation Research Board*, NCHRP Web Documents 47, Project 20-50(3/4).

LTPP, 2002b, "Data Analysis: Variations in pavement design imputs". In: *Transportation Research Board*, NCHRP Web Documents 48, Project 20-50(5).

LTPP, 2002c, "Data Analysis: Factors Affecting Pavement Smoothness". In: *Transportation Research Board*, NCHRP Project 20-50(08/13).

MACLEOD, D. R. e WALSH, R., 1998, "Markov Modelling – a Case of Study". In: *4th International Conference on Managing Pavements*, South Africa.

MARCON, A.F.,1996, *Contribuição ao Desempenho de um Sistema de Gerência de Pavimentos para a Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina,* Tese de D.Sc., ITA, São José dos Campos, SP, Brasil.

MEDINA, J., 1988, "Consideração Sobre a Umidade de Equilíbrio em Pavimentos". In: *Anais 23ª Reunião Anual de Pavimentação – ABPv*. vol. 1, Florianópolis, Brasil.

MEDINA, J., 1997, *Mecânica dos Pavimentos*, 1ª ed. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.

MEDINA, J., MACEDO, J.A.G., MOTTA, L.M.G. et al., 1994, "utilização de Ensaios Deflectométricos e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos". In: *28ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv*, Belo Horizonte, MG.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA/SUDENE, 1973, Levantamento Exploratório - Reconhecimento de Solos do estado do Ceará, Vol. I.

MOAVENZADEH, F., STAFFORD J.H., SUHBRIER J., Et al., 1971. "Highway design study phase I: the model". *BIRD Economics Department Working Paper nº 96,* Washington DC: International Bank for Reconstruction and Development.

MONISMITH, C.L., 1993, "Analytically Based Asphalt Pavement design and Rehabilitation: Theory to Practice, 1962 – 1992. *Transportation Research Record 1354*, pp. 5 – 28.

MOREIRA, A.A.N., 1973, Geologia e Geomorfologia. ATLAS do Ceará. IBGE/SUDEC.

MOROSIUK, G., e ABAYNAYAKA S.W., 1982. "Vehicle operating costs in the Caribbean: an experimental study of vehicle performance". *TRRL Laboratory Report 1056*, Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.

MOTTA, L. M. G., 1991, *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaios de Cargas Repetidas.* Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MOTTA, L. M. G., 1991, Avaliação de Pavimentos uma Programação, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MOTTA, L.M.G., MACEDO, J.A.G., MEDINA, J. et al., 1995, "Avaliação Estrutural de Trechos Experimentais na Rodovia Carvalho Pinto – Análise Preliminar". In: *29ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv*, Cuiabá, MT.

MOTTA, L.M.G. e MEDINA, J., 1986, "A Questão da influência da temperatura na Deformabilidade Elástica dos Pavimentos Flexíveis". In: *21ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv*, Salvador, Bahia.

NCHRP 35, 2001, "Rehabilitation Strategies for Highway Pavements"**.** NCHRP Web Document 35 (Project C1-38).

NIMER, E., 1977, Clima, Geografia do Brasil. Região Nordeste.

ODA, S., FERNANDES JR, J.L. & SÓRIA, M.H.A., 1997, "Seleção de Atividades de Manutenção e Reabilitação de Estradas não Pavimentadas para Fins de Gerência de Vias". In: *Anais XI ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*; Rio de Janeiro/ RJ. Pp.370-383.

PARSLEY, L.L. & ROBINSON R., 1982. "The TRRL road investment model for developing countries (RTIM2)". *TRRL Laboratory Report 1057*, Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.

PATERSON, W.D.O., 1987, "Road Deterioration and Maintenance Effects Models for Planning and Management". *The World Bank, Baltimore*, The Johns Hopkins University Press.

PATERSON, W.D.O e SCULLION, T., 1990. "Information systems for road management: draft guidelines on system design and data issues". IN: *Infrastructure and*

Urban Development Department Report INU 77. Washington, DC. The Word Bank. Disponível no site www.wds.worldbank.org.

PETERSON, D.E., 1987, Pavement Management Practices. National Cooperative Research Program. *Synthesis of Highway Practice, 135*. Transportation Research Board, 139 p.

PINTO, J. A. V., 1993, "Dimensionamento das Estruturas de Pavimentos e as Políticas de Gestão Rodoviária". In: 27ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv.

PINTO, S., 1989, *A Gerência de Pavimentos no Domínio Rodoviário.* 2º Seminário de Qualificação ao Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PINTO, S., 1991, *Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos.* Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PINTO, S. & PREUSSLER, E., 2001, Pavimentação Rodoviária. Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Copiarte, Copiadora e Artes Gráficas Ltda. Rio de Janeiro, RJ.

PREUSSLER, E. S., 1983, *Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PREUSSLER, E. S., 1998, "Desenvolvimento e implementação de sistemas de gerência rodoviária". *1º Simpósio de Obras Rodoviárias*.

PROZZI, J.A. & MADANAT, R., 2003, "Empirical-Mechanistic Model for Estimating Pavement Roughness". In: *Transportation Research Board 82th Annual Meeting* Washington, D.C.

QUEIROZ, C.A.V., 1981, "*Performance Prediction Models for Pavement Manegement in Brazil*". Dissertation for Degree of Doctor of Philosophy, University of Texas, Austin.

QUEIROZ, C.A.V., HUDSON, W.R. e HAAS, R., 1992, "Standardization of Pavement Manegement Sistems in Brasil and Other Developing Countries". In: *Transportation*

Researh Record 1344 – Transportation Research Board, Washington DC/USA – p. 31-37.

QUEIROZ, C.A.V., 1984, Modelos de Previsão do Desempenho para Gerência de Pavimentos no Brasil; *Ministério dos Transportes; Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes – GEIPOT,* Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER.

RODRIGUES, R. M., 1987, *Projeto de Reforço de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários pelo Método de Resiliência: Uma Nova Versão do Programa TECNAPAV*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RODRIGUES, R. M., 1991, *Estudo do Trincamento dos Pavimentos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROHDE, G. T.; JOOSTE, F., SADZIK, E. et al., 1998, "The Calibration and Use of HDM-4 Performance models in a Pavement management System". In: *4th International Conference on Managing Pavements*, South Africa.

SALEH, M. F. e MAMLOUK, M.S., 2002, "Calibration and Verication of a Mechanistic Pavement Roughness Performance Model". In: *Transportation Research Board 81st Annual Meeting* Washington, DC.

SAYERS, M. W., GILLESPIE, T. D. & PATERSON, D.O., 1986a, "Guidelines for the Conduct and Calibration of Road Roughness Measurements". *World Bank Technical paper number 46.* Washington, DC.

SAYERS, M. W., GILLESPIE, T. D. & QUEIROZ, C. A. V., 1986b, "The International Road Roughness Experiment-establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements". *World Bank Technical paper number 45*. Washington, DC.

SAYERS, M., 1995, "On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile". Pavement-Vehicle Interaction and Traffic Monitoring. Transportation Research Record, No. 1501. pp. 1-12.

SAYERS, M. W. e KARAMIHAS, S. M., 1998, "The Little Book of Profiling. Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles". The Regent of the University of Michigan, 102 p.

SHAHIN, M.Y. e KOHN S.D., 1979, "Development of Pavement Condition Rating Procedures for Roads, Streets and Parkings Lots". *In: V.2 Distress Identification Manual*. Springfield Construction Engineering Research Laboratory, United States Corps of Engineers, (Technical Report M-268).

SHRP, 1993, "Distress Identification Manual for the Long Term Pavement Performance Project". *Strategic Highway Research Program,* National Academy of Sciences, Washington, D C.

SHRP/FHWD, 2003, "Distress Identification Manual for the Long Term Pavement Performance Project". *Strategic Highway Research Program,* Federal Highway Administration, FHWA – RD – 03-031, Washington, D C.

SILVA, L.F.M., 2002, "*Fundamentos Teórico-Experimentais da Mecânica dos Pavimentos Ferroviários e Esboço de um Sistema de Gerência Aplicado à Manutenção da Via Permanente*". Tese D.Sc. COPPE/UFRJ.

SILVA, R. A., 1985, "Probabilidade de Chuvas no Estado do Ceará". *Boletim Técnico de Recursos Hídricos*, UFC, Ceará.

SOUZA, R. O., FARIAS, M. M. & SHIMOISHI, J. M., 2001, "Estado da arte sobre medição da irregularidade longitudinal em pavimentos asfálticos". In: *33ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv,* Florianópolis/SC.

SOUZA, M. L., 1981. "Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis". *IPR Publ. 667*, *3. ed. revis. e atual*, Rio de Janeiro, 34 p., a 1ª edição é de 1966.

TACK, J. N. & CHOU, E. Y. J., 2002, "Multiyear Pavement Repair Scheduling Optimization by Preconstrained Genetic Algorithm". In: *Transportation Researh Record 1816 – Journal of Transportation Research Board*, p. 3-9, Washington, DC/USA.

VILLIBOR, D. F. e FORTES, F.Q., 1997, "Considerações Sobre Defeitos de Pavimentos de Baixo Custo e Orientação para sua Conservação". In: *1º SINBATRA – Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego*; Outubro, Rio de Janeiro / RJ;

VISSER, A.T., KANNEMAYER, L. e TEKIE, S., 1998, Experience With Roughness Measurements for Pavement Management In Southern Africa. *4th International Conference on Managing Pavements*, South Africa.

WATANATADA T., HARRAL. C.G., PATERSON W.D.O., et al., 1987, "The highway design and maintenance standards model volume 1: description of the HDM-III model". *The Highway Design and Maintenance Standards Series,* Baltimore: Johns Hopkins for the World Bank.

WITCZAK, M. W., 1989, "Uses and Misuses of Pavement Deflection Data". *2º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, ABPv*, Rio de Janeiro.

YODER, E. J. & WITCZAK, M W., 1975, *Principles of pavement design.* 2ª ed. EUA: Wiley-Interscience Publication.

YSHIBA, J. K., 2003, "*Modelos de Desempenho de Pavimentos: Estudo de Rodovias do Estado do Paraná*". Tese de D.Sc., EESC, São Paulo.

ZERBINI, L. F. e FERNANDES JÚNIOR., J. L., 1999, "Desenvolvimento de Modelos de Desempenho para Utilização em Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos". In: *Anais XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, p. 521-532.

BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992, "Solos Coesivos – Determinação da Resistência à Compressão Simples". *NBR 12770*, Rio de Janeiro.

AZEVEDO, M. C. M., MATOS, A. C.C.N., PEREIRA, P.A.A.,et al., 2001, "Metodologia para Inspeção Visual do Estado de Conservação de uma Rede de Estradas". IN: *Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Auburn, USA.

BUTT, A.A., SHANIN, M.Y., CARPENTER, S.H., CARNAHAN J.V. 1987, "Application of Markov Process to Pavement Management Systems at the Network level". In: *International Conference on Managing Pavements, 3.*, San Antonio, Texas 1994 Anais, Washington, D. C., TRB. V.2, p. 159-172.

DNER, 1996, “Manual de Pavimentação”. *IPR/DNER/ABNT Publ. 697*, 2 ed. Rio de janeiro, 320 p.

FONSECA, O.A., 1997, Métodos de Manutenção e Reabilitação. Coletânea.

HUANG, Y. H., 1993, *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

LYTTON, R.L., 1987, “Concepts of Pavement Performance prediction and modeling”. In: *North American Conference on Managing Pavements, 2., Proceedings,* Toronto. V.2, p.2.3-2.20.

MEDINA, J., PREUSSLER, E. S. & MOTTA, L. M. G., 1980 “Aplicação do cálculo da deformação resiliente no aperfeiçoamento do dimensionamento de pavimentos flexíveis” . In: *Anais 5º Encontro de Asfalto, IBP*, pp. 197-236.

MOTTA, L. M. G. & MAHLER, C. F., 1982, “Análise comparativa de diferentes métodos de cálculos de sistemas em camadas”. In: *Anais, 6º Encontro de Asfalto*, *IBP* pp. 91-106.

MOTTA, L. M. G. e MEDINA, J., 1991, “A fadiga das misturas asfálticas e o desempenho estrutural de pavimentos flexíveis”. *6º Congresso Íbero-Latino Americano*, T3-10, 14 p.

MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. M., et al., 1996, “Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas”. *Tradução Comentada*, Petrobrás.

MOTTA, L. M. G. & MACÊD0, J. A G., 1998, “Proposição de Método para Ensaio Triaxial Dinâmico em Solos para Pavimentos”. In: *Anais XII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, v.I pp. 602-13, Fortaleza-Ceará.

NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F., 1981, “Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias”. In: *Anais, SIMP.BRAS. SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA,* COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, v.1, Pp. 30-41.

PEREIRA, P.A.A. & DELANNE, Y., 2000., “Caracterização da Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos Rodoviários - Definição de Especificações”. *Editado por Paulo Pereira e Yves Delanne, ISBN 972-97811-4-1*, Universidade do Minho.

PINTO, S. & MOTTA, L. M. G., 1995, "Catálogo de Curva de Fadiga". *Associação Brasileira de Pavimentação- ABPv*, boletim técnico nº 16.

PINTO, S. & PREUSSLER, E. S., 1980, "Módulos Resilientes de Concretos Asfálticos". In: *15ª Reunião Anual de Pavimentação ABPv*, trabalho nº 19, Belo Horizonte.

PREUSSLER, E. S., 1978, *Ensaios Triaxiais dinâmicos de um Solo Arenoso*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PREUSSLER, E. S. & PINTO, S., 1982." Proposição de método para projeto de reforço de pavimentos flexíveis, considerando a resiliência". In: *Anais, 17ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv*. Vol.1, pp. II. 205 – II. 263, Brasília, Jul.

PREUSSLER, E. S., PINTO, S. & MEDINA, J., 1981, "Determinação da Vida de Fadiga de Concretos Asfálticos Brasileiros e Aplicação no Dimensionamento de Reforços de Pavimento". In: *Anais 16ª Reunião Anual da Associação Brasileira de Pavimentação ABPv*, Recife.

SANTANA, H., 1998, "Alguns Conceitos Básicos e Fatos Notáveis no Estudo de Pavimentação". In: *31ª Reunião Anual de Pavimentação ABPv*, São Paulo, Outubro.

SENÇO, W.,1997, *Manual de Técnicas de Pavimentação*, 1 ed. S. Paulo, PINI.

SHRP, 1994a, "Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE): the Product of SHRP Asphalt Research Program". *Strategic Highway Research Program A-410*, National Research Council, Washington, DC.

SHRP, 1994b, "The SUPERPAVE Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods and Practices". *Strategic Highway Research Program A-379*, National Research Council, Washington, DC.

GLOSSÁRIO

AASHO - American Association of State Highway Officials.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials.

ACRAa - Porcentagem de área de trincamento do pavimento.

AGE2 - Idade do pavimento desde a construção, execução de camada selante, reabilitação ou reconstrução, em anos.

AGE3 - Idade do pavimento desde a construção, reabilitação ou reconstrução, em anos.

ALTERNATIVA – é cada uma das opções disponíveis para corrigir um problema de um pavimento.

ANÁLISE EM NÍVEL DE PROJETO – é a avaliação de pavimento para selecionar o tipo e a data de execução do serviço de manutenção.

ANÁLISE EM NÍVEL DE REDE – é a avaliação dos pavimentos para possibilitar a seleção de projetos, programação de projetos e estimativa de orçamento.

ANÁLISE BENEFÍCIO/CUSTO – é uma técnica destinada a relacionar os benefícios econômicos aos custos ocorridos para obter a solução.

ARAN – Automatic Road Analyser.

ASTM - American Society for Testing and Materials.

AVALIAÇÃO DE CONDIÇÃO – é o processo de quantificar uma característica de condição do pavimento por meio de um índice.

BANCO DE DADOS – é a reunião das informações e/ou de dados numa forma recuperável.

BASE DE DADOS – é um conjunto de dados e/ou de informações, coletados e relativos aos pavimentos de uma malha viária.

Base alternative – é o default do programa HDM 4.

BENEFÍCIO – é toda conseqüência desejável de uma atividade.

BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento.

BPR - Bureau of Public Road.

CAPACIDADE ESTRUTURAL – é o número máximo acumulado de carregamentos que um pavimento pode suportar sem ocorrer uma degradação insuportável.

CARGA DE EIXO EQUIVALENTE – é o número de carregamentos do eixo padrão que produziria, na condição de pavimento, um efeito equivalente ao produzido por qualquer combinação de carregamentos por eixos de magnitudes variadas.

CGRA - Canadian Good Roads Association.

COMP - Compactação relativa das camadas de base, sub-base e do subleito selecionado, em porcentagem.

CONDIÇÃO DE PAVIMENTO – é a representação quantitativa da degradação de um pavimento num dado momento de tempo.

CONDIÇÃO ESTRUTURAL – revela a capacidade da estrutura de um pavimento de trabalhar num nível aceitável.

CONDIÇÃO FUNCIONAL – determina quão bem o pavimento desempenha sua função como uma superfície de rolamento destinada ao tráfego de veículos.

CONSERVAÇÃO PREVENTIVA – compreende as atividades executadas antes que as características essenciais de condição de um pavimento excedam seus limites aceitáveis a fim de evitar a degradação ou retardar a velocidade de deterioração. São atividades que não alteram a capacidade estrutural do pavimento, quando muito o mantém a existente. Exemplo: lama asfáltica, selagem de trincas, etc.

CONSERVAÇÃO ROTINEIRA – compreende todas as atividades executadas na rotina diária de conservação, destinadas a preservar as características superficiais do pavimento. É caracterizada pelas correções pontuais das faixas de rolamentos e de acostamentos, pela desobstrução e manutenção de equipamentos de drenagem e pela conservação da faixa de domínio.

COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia.

COV - Custo de operação dos veículos.

CQ - Indicador qualitativo da construção da camada de revestimento asfáltico, sendo CQ = 1 se o revestimento tem falha construtiva, caso contrário CQ = 0.

CRP - Fator de retardamento de progressão do trincamento devido ao tratamento preventivo.

CRT - Tempo estimado de retardamento do início do trincamento devido à realização dos serviços de manutenção, em anos.

CRXa - Área de trincamento no início do ano de análise.

CURVA DE PREVISÃO – representa um índice do pavimento versus o tempo.

CUSTO DE CICLO DE VIDA – é a avaliação econômica de um item, de uma área, de um sistema ou de um meio e às correspondentes alternativas de projeto, considerando todos os custos significativos de aquisição ao longo da vida econômica.

CUSTOS – é toda conseqüência financeira de uma atividade.

DD - Deflexão máxima medida com o Dynaflect.

DEFEITO – é a degradação visível na superfície do pavimento.

DEFLEXÃO – é a deformação vertical recuperável da superfície de um pavimento quando submetida a um carregamento.

DEGRADAÇÃO – é o dano ao pavimento provocado pelos fatores de deterioração ao longo do tempo.

DERT-CE - Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes.

DESEMPENHO – é a habilidade de um pavimento servir satisfatoriamente ao tráfego ao longo de um período de tempo.

DET/UFC - Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará.

DI - Distress Index.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.

DVB - Deflexão máxima medida pela viga Benkelman, em 0,01 mm.

DYNAFLECT - Sistema eletro-magnético destinado à mensuração deflexões dinâmicas da superfície ou estrutura causadas por vibrações de cargas.

ECR - Trincamento previsto além da quantidade que existia no antigo revestimento, isto é, em pavimentos reabilitados.

EP - Erro padrão.

ER - Variável indicadora do estado de reabilitação (ER = 0, construído; ER = 1, reabilitado).

ERM - Valor do expoente que é função das características da superfície do pavimento e precipitação.

ESTRATÉGIA – é um plano para tratar todos os aspectos de um problema particular. Uma estratégia de reabilitação é um plano para manter um pavimento numa determinada condição de serventia durante um período de tempo especificado ou poderia ser um conjunto de ações de conservação, restauração e/ou reconstrução selecionadas para preservar uma malha inteira em níveis especificados de desempenho.

ESTRATÉGIA ÓTIMA – é a estratégia entre as alternativas consideradas onde se espera maximizar a realização dos objetivos da gerência sujeita às restrições impostas.

FATORES DE DEGRADAÇÃO – são fatores que agem no pavimento, ao longo do tempo, e causam a sua degradação. Exemplo: trafego e clima.

FHWA - Federal Highway Administration.

FV - Fator de Veículo.

FWD - Falling Weight Deflectometer.

GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes

GHDM - Grupo de Aplicação do Modelo HDM.

GIRR - Gestion Intelligente des Réseaux Routiers.

GPS - Estudos Gerais em Pavimentos.

GRAU DE DEGRADAÇÃO – expressa a quantidade ou medida de um modo particular de degradação. Exemplo: profundidade da trilha de roda em milímetro.

HDM - Highway Development and Management System.

HRB - Highway. Research Board.

HSOLD - Espessura total do revestimento antigo, mm.

HST1 - Tensão de tração horizontal na face inferior do revestimento (kgf/cm2).

ICP - Índice de Condição do Pavimento.

IDADE - Idade do pavimento desde a abertura do tráfego, em anos.

IGG - Índice de Gravidade Global.

IGI - Índice de Gravidade Individual.

IMRN – Intelligent Management of Road Networks.

IMS - Information Management System.

ÍNDICE DE PAVIMENTO – atribui um valor à condição funcional de um pavimento, às vezes parcialmente baseado na condição estrutural.

INSELBERG - Morro ou elevação topográfica que se destaca em uma superfície de aplainamento como um relevo residual não aplainado.

INTERVENÇÃO – toda obra ou serviço executado num pavimento destinado a sua conservação, restauração ou reconstrução.

IP - Índice de Prioridade.

IPLANCE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará.

IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

IRI - Índice Internacional de Irregularidade, m/km.

IRIo - Valor do IRI inicial, em m/km.

IRREGULARIDADE – é uma característica da condição funcional de um pavimento, compreendendo todos os desvios verticais nos sentidos longitudinais e transversal, relacionados à superfície original.

ISA - Índice de Serventia Atual.

ISC (CBR) - valor do Índice de Suporte Califórnia

IRIo - Irregularidade longitudinal no início do ano da análise (IRI m/km).

Kcp - Fator de deterioração especificado pelo usuário para a progressão da profundidade média das trilhas de roda.

Kei - Fator de deterioração para o início do trincamento, calculado pela relação entre a idade esperada do revestimento e a idade prevista pelo modelo HDMIII, para o mesmo volume de tráfego.

Kge - Fator de deterioração relativo ao ambiente.

Kgm - Fator de ajuste para o coeficiente ambiental.

Kgp - Fator de deterioração para progressão da irregularidade.

LCPC - Laboratoire Central des Ponts de Chaussés.

Log QI - Logaritmo decimal do índice de quarto de carro.

LTP - Transverse Profile Logger.

LTPP – Long Term Pavement Performance.

LVC - Levantamento visual contínuo.

M&R - Manutenção e reabilitação.

MANUTENÇÃO – compreende qualquer atividade executada para preservar a superfície original e as qualidades estruturais de um pavimento, a fim de permitir o uso seguro, econômico e eficiente da rodovia.

MAYS RIDE METER OU MAYSMETER - haste anexada ao eixo e a um transmissor, ambos instalados em um veículo de passeio.

MIE - Efeito das intervenções nos trabalhos de manutenção, além do efeito no estado da rodovia, determina os respectivos custos.

MIT - Massachusserrs Institute of Technology.

MMP - Precipitação média mensal, em mm/mês.

MODELO DE OTIMIZAÇÃO – é uma descrição matemática ou algoritmo projetado para comparar estratégias alternativas e identificar os méritos relativos de cada estratégia de acordo com os critérios de decisão atribuídos, tais como segurança, custo, etc.

MODELO DE PREVISÃO – é uma descrição matemática dos valores esperados que uma característica do pavimento assuma durante um período de análise especificado.

N - Número equivalente de solicitações do eixo padrão de 80 KN ou 8,2 tf.

NA - Número equivalente de solicitações do eixo padrão de 80 KN ou 8,2 tf, calculado pelo método da AASHTO.

NCHRP - National Cooperative Highway Research Program.

NDTT - Núcleo de Desenvolvimento Tecnológico de Transportes.

NE - Número estrutural que representa a resistência necessária (relativo à espessura) da estrutura total do pavimento.

NEC - Número estrutural corrigido.

NÍVEL DE ADVERTÊNCIA – é um valor definido (limite) do índice de condição de um pavimento que, quando excedido, adverte que se deve considerar a manutenção da rodovia.

NÍVEL DE INTERVENÇÃO – é um valor definido (limite) do índice de condição de um pavimento que, quando excedido, requer que a manutenção seja executada.

NÍVEL DE PROJETO – é o nível no qual as decisões técnicas de gerência são tomadas para projetos específicos ou segmentos de pavimentos.

NÍVEL DE REDE – é o nível no qual são tomadas as decisões administrativas principais que alteram programas para malhas ou sistemas rodoviários.

OTIMIZAÇÃO – é o processo, sujeito a restrição, de maximizar os benefícios presentes líquidos e/ou à obtenção de outros objetivos.

P - Carga Axial, em kN.

PCRA - Trincamento total ocorrido antes da última reabilitação, %.

PCRW - Trincas de classe 2 e 3 ocorridas antes da última reabilitação, %.

PCRX - Trincamento nas antigas camadas de revestimento e base, em porcentagem.

PERÍODO DE ANÁLISE – é o período de tempo para o qual a análise econômica é feita.

PESAGEM DE VEÍCULOS – é o processo de estimar as cargas totais, por eixo e/ou grupo de eixos dos veículos. A pesagem dinâmica é caracterizada pela estimativa das cargas com o veículo em movimento. A pesagem é dita estática se a inferência das cargas só for possível com o veículo parado.

PIARC - World Road Association.

PICR - Pesquisa da Inter-relação entre os Custos de Construção, Manutenção e Utilização de Rodovias (1981).

PPI - Planos Plurianuais de Investimentos.

PSI - Present Serviciability Index.

QI - Quociente de irregularidade, obtido com o Integrador de Irregularidade Longitudinais IPR/USP, em contagens/Km.

QIa - Quociente de irregularidade do pavimento no início no ano de análise, em contagens/Km.

QIPR - Quantificador de Irregularidades de Pavimentos Rodoviários.

REM - Porcentagem de área que sofreu remendos profundos.

R^2 - Coeficiente de determinação.

RD - Deterioração de rodovias, utilizado para prever a deterioração dos pavimentos.

RDMa - Profundidade média da trilha de roda em ambas as trilhas, em mm.

RDSb e RDSa - Variação do desvio padrão da profundidade média da deformação permanente (em ambas as trilhas de roda) durante o ano de análise, em mm.

REABILITAÇÃO – compreende qualquer intervenção executada para melhorar a capacidade estrutural de um pavimento.

RECONFORMAÇÃO (RESHAPING) – é a operação para restaurar o perfil inicial de um pavimento ou para melhorá-lo. Exemplo: preenchimento das trilhas de roda com material asfáltico.

RECONSTRUÇÃO – é a construção equivalente a uma nova estrutura de pavimento, que usualmente envolve a completa remoção e substituição da estrutura do pavimento existente incluindo materiais novos e/ou reciclados.

REFORÇO – é a colocação de uma ou mais camadas sobre o pavimento existente para obter uma capacidade adicional de suporte.

RELIA - Pavimentos com tratamentos superficiais sobre bases granulares.

RELIC - Pavimentos de concreto asfáltico sobre bases granulares.

RESTAURAÇÃO – compreende os serviços para restabelecer a serventia e prolongar a vida de serviço de um pavimento existente.

RIaw - Irregularidade longitudinal após recapeamento (IRI m/km).

RIbw - Irregularidade longitudinal antes da recapeamento (IRI m/km).

RMSVA - Root Mean Square of Vertical Aceleration.

RN (RIDE NUMBER) - número de rolamento.

ROMDAS - Road Measurement Data Acquisition Sistem.

RQI - Ride Quality Index.

RTIM - Modelo de Investimento em Transporte Rodoviário.

RUC - Efeito sobre os custos dos usuários, contemplando custos operacionais dos veículos, dos acidentes e dos tempos de viagem.

SEN1 - Energia de deformação na face inferior do revestimento (10-4 kgf.cm).

SERVENTIA – é a aptidão de uma seção específica de um pavimento para servir ao tráfego nas condições existentes, a um tempo particular.

SERVENTIA ATUAL - é a condição de um pavimento, quanto à superfície de rolamento, conforme percepção pelo público em geral.

SGP - Sistemas de Gerência de Pavimentos.

SHRP - Strategic Highway Research Program.

SIG - Sistema de Informações Geográficas.

SIGMA - Sistema de Gerência de Rodovias utilizado pelo DERT-CE.

SISTEMA DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS – é um conjunto de ferramentas ou métodos que ajudam os tomadores de decisão a encontrar estratégias viáveis para fornecer, analisar e manter pavimentos em condições adequadas.

SMITR – sistema medidor tipo-resposta.

SNCK - Número estrutural modificado, ajustado ao efeito do trincamento.

SPS - Estudos Específicos em Pavimentos.

SV – Slope variance - Variância da declinação longitudinal.

TAC - Transportation Association of Canada.

TAXA INTERNA DE RETORNO – é a taxa de juros para a qual a somatória do valor presente dos benefícios é igual ao valor presente dos custos ao longo do período de análise.

TECNAPAV - Tecnologia Nacional para Restauração de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários - Programa elaborado por E. S. Preussler e Salomão Pinto em 1984.

TRATAMENTOS – materiais e métodos utilizados para corrigir uma ou mais deficiências na superfície de um pavimento.

TRRL - Transport and Road Research Laboratory.

TS - Variável indicadora “dummy” do tipo de revestimento.

TYCRA - Número médio de anos para o aparecimento de trincas.

UMSA - Ultrasonic Measurement Sistem Array.

USACE - United States Army Corps of Engineers.

VALOR PRESENTE – é o valor atual de um custo ou benefício futuro descontados os juros correspondentes.

VIABILIDADE – é o estudo desenvolvido para verificar se os benefícios de uma estratégia, projeto ou atividade são maiores que os custos correspondentes.

VIGA BENKELMAN - equipamento utilizado em medidas de deflexões.

VMD - Volume médio diário de veículos.

YE4 - Número de operações do eixo equivalente de 80KN para o ano de análise, calculado pelo método da AASHTO, em milhões por faixa de tráfego.

ΔACRA - Acréscimo na superfície total trincada durante o ano de análise (% total trincada da pista).

ΔACRAd - Mudança prevista na área de trincamento, durante o ano de análise, devido à deterioração, em porcentagem da área total do revestimento.

ΔCRXd - Variação prevista do trincamento, devido à deterioração durante o ano de análise, em porcentagem.

ΔQId - Aumento previsto na irregularidade durante o ano de análise, provocado pela deterioração, em contagem/Km.

ΔRDMd - Mudança da profundidade média da trilha de roda durante o ano de análise devido à deterioração, em mm.

ΔRI - Redução na irregularidade longitudinal após recapeamento (IRI m/km).

ΔRDS - Acréscimo no desvio padrão do afundamento de trilha de roda durante o ano de análise.

ΔRIc - Acréscimo na irregularidade longitudinal devido ao trincamento durante o ano de análise (IRI m/km).

ΔRIe - Acréscimo na irregularidade longitudinal devido a fatores ambientais durante o ano de análise (IRI m/km).

ΔRIr - Acréscimo na irregularidade longitudinal devido ao afundamento de trilha de roda durante o ano de análise (IRI m/km).

ΔTCRA - Período de tempo em que ocorre evolução de todos os tipos de trincas, em anos.

ΔTR - Trincamento total de área do pavimento, em %.

ANEXO I

PROCESSAMENTOS COM O PERFILÔMETRO A LASER E PROCESSAMENTO DOS RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS.

III.1 A operação de campo com o *Ciberlaser* (CIBERMÉTRICA, 2005)

Inicialmente é fixado o suporte no pára-choque do veículo. Antes do aperto final verifica-se com o nível de bolha se a parte externa do suporte, onde a barra será presa, está perpendicular ao chão. Em seguida é colocada a barra (perfil) de alumínio e verificada a sua altura em relação ao chão. O hodômetro é fixado numa das rodas traseiras do veículo, substituindo dois dos parafusos da roda (diametralmente opostos) por dois parafusos especiais. A "gaiola" do hodômetro, por sua vez, é fixada, utilizando as roscas internas dos parafusos trocados e verificando se ela encaixou bem e por igual na ponta do eixo do veículo. Coloca-se o eixo do hodômetro no orifício central da "gaiola", posicionando a parte chata do eixo alinhada com o parafuso *Allen*. O hodômetro deve girar livremente e estar alinhado, para em seguida ser instalado o arame que impede a rotação da sua carcaça. Conecta-se o cabo do hodômetro, fixando-o no arame com fita adesiva.

As conexões eletro-eletrônicas são efetuadas colocando o *Hub* sobre o banco traseiro do veículo. O equipamento *Hub* é um módulo de concentração das informações coletadas pelos sensores, que recebe as informações do hodômetro, acelerômetros e medidores laser, organiza os dados, sincroniza as medições e envia tudo pelo computador através da porta USB. Os módulos laser são posicionados no chão, próximos à barra de alumínio, na ordem de instalação (Módulo 1 sempre atrás do lado do motorista). Liga-se o cabo nos módulos e no *Hub*. Recomenda-se que o conector da ponta do cabo conecte-se ao Módulo 1, apenas para que o cabo entre no veículo pelo lado do passageiro. Em seguida são feitas as seguintes conexões:

1. Cabo do hodômetro no *Hub*;
2. *Hub* na entrada 12V do inversor;
3. *Hub* e o Computador via cabo USB.
4. Fonte do computador no inversor.
5. Inversor no computador.

Entra-se no programa *Ciberlogger* (com a opção /calibrar), verificando se tudo está funcionando bem (para verificar os laser, levante os módulos do chão para que eles entrem no curso de medição).

Para a zeragem dos acelerômetros o carro é posicionado em local plano de maneira que o perfil de alumínio esteja nivelado em ambos os sentidos. Os módulos que contém os acelerômetros (L1 e L5) são apoiados sobre o perfil de alumínio (laser apontando para o chão). Aperta-se o botão "**acelerômetro em posição normal**" no software. Isto fará com que ambos os acelerômetros passem a indicar a aceleração da gravidade.

Os módulos são virados para cima, de maneira que os laser apontem para o céu, apoiando-os sobre o mesmo lugar que estavam apoiados anteriormente no perfil de alumínio. Aperta-se o botão no software "**acelerômetro em 180º**". Isto fará com que ambos os acelerômetros passem a indicar a aceleração da gravidade negativa. Volta-se novamente o módulo com os laser apontados para baixo e é verificado se a marcação continua correta, se não estiver, o procedimento de zeragem pode ser repetido.

A fixação dos módulos no perfil de alumínio é feita da seguinte maneira:

- Colocando os módulos laser no perfil de alumínio, lembrando que as cabeças dos parafusos que fixam as cantoneiras dos módulos na barra, também correm dentro das canaletas do perfil. Para este procedimento, o *Hub* pode ser desligado e desconectado os cabos dos módulos, embora não haja prejuízo em fazê-lo com os módulos ligados. Os 3 (três) módulos foram dispostos na seguinte ordem: L1 atrás do motorista, L5 do lado do passageiro e L2 entre eles, com a distância de fixação dos módulos variando de acordo com as necessidades do levantamento.
- Determinado o posicionamento, antes do aperto final dos módulos no perfil, verifica-se com o esquadro e/ou nível de bolha a perpendicularidade entre as cantoneiras que fixam os módulos e o perfil de alumínio.
- Ajusta-se o cabo que sobrou entre os módulos ao perfil de alumínio com fita auto-adesiva e o cabo à lateral ou traseira do veículo com fita adesiva, se necessário, de modo que toda a sobra de cabo fique no interior do veículo.

III.2 Procedimentos para verificação dos *laser*

- Com o veículo parado, são ligados o equipamento e o computador, entra-se no software com a opção /calibrar. Há um botão "**zerar**" em cada módulo.
- Posiciona-se cada uma das faces de um bloquinho de ebonite, que vem com o equipamento, sob o laser e é feita uma leitura. O bloquinho mede (20 x 40 x 80 mm). O valor indicado pelo laser deve corresponder à medida do bloquinho, com um erro máximo de 0,5 mm. Erros maiores do que 0,5 mm em qualquer uma das faces indicam que o módulo deve ser enviado para calibração.
- O procedimento é repetido para cada um dos laser.

III.3 Procedimentos para a zeragem dos *laser*

- Como a medição desta pesquisa incluía a medida da média do afundamento das duas trilhas de roda, sendo usado para tanto, três laser, um sobre cada trilha e o terceiro laser posicionado sobre o centro da faixa, se fez necessário utilizar o perfil de alumínio pequeno e avulso para zerar os laser em relação a um plano.
- Para isto, com os módulos laser devidamente fixados à barra, o *Ciberlogger* é ativado na opção /calibrar, ligado o sistema e posicionada a face preta do perfil de alumínio pequeno sob a mira dos três laser simultaneamente e em seguida aperta-se o botão "**zerar**" de cada laser (1, 2 e 5).
- Depois de apertado os botões, ainda com o perfil sob os laser, todos eles deverão marcar zero.
- Em caso de dúvida quanto à indicação do ATR durante a operação do equipamento ou quando por alguma razão tenha havido qualquer movimentação de um dos módulos laser, para-se o veículo, o arquivo em gravação é fechado e uma nova zeragem é procedida.

III.4 Operando com o *Software Ciberlogger*

A operação com o *Ciberlogger* tem os seguintes procedimentos:

- Após carregar o *Ciberlogger*, é inserida a distância entre os módulos conforme sua fixação na barra, em centímetros. Antes de operar é importante conhecer bem a tela do *Ciberlogger*, mostrada na Figura 5.18 do Capítulo 5.

Do lado direito da tela é possível acompanhar o estado de cada um dos laser. Ao lado da caixa de cada módulo existem três informações: o valor da distância medida pelo laser, um valor em vermelho precedido da palavra "**fora**" e um valor em azul precedido da palavra "erro".

O valor da distância medida pelos laser não é um valor absoluto da distância dele até o chão, pois em primeiro lugar o laser só começa a medir a aproximadamente 20 cm de sua caixa e em segundo lugar, esse valor pode ter sido zerado numa posição qualquer visando à medida de ATR.

O valor em vermelho precedido da palavra "**fora**" significa quantas medidas aquele laser não fez por se encontrar fora do curso útil. Esse valor deve ser muito baixo. Normalmente acontece uma ou outra vez num pavimento plano e um pouco mais de vezes quando se passa em uma lombada ou se desce um degrau de meio-fio/acostamento, por exemplo. Durante a operação, o percentual de medidas fora de curso do laser e onde mais ocorreram é indicado ao lado do botão gravar/parar. Isto facilita o acompanhamento do funcionamento dos laser. Valores percentuais acima de 5% podem indicar a presença de sujeira sob o módulo laser ou também uma superfície com macrotextura muito acentuada, além, é claro, de poder ser um indicativo de problemas no módulo que pode necessitar de reparos.

O valor em "**azul"** indica a presença de erros na comunicação entre o *Hub* e o módulo. Pode acontecer um ou outro eventualmente. Se acontecer muitas vezes, é também um indicativo que o módulo pode precisar de reparos.

Existe ainda na tela do programa um botão "**zera erros"**, este botão pode ser pressionado a qualquer momento e serve para zerar tanto os números vermelhos, quanto os azuis, o que sem dúvida ajuda a verificar depois de algum tempo se os erros continuam ocorrendo e qual é sua freqüência.

Do lado direito da tela estão os indicadores dos acelerômetros, neles são ainda mais incomuns medidas fora ou erros, mas é recomendável também fazer um acompanhamento. A medida dos acelerômetros é feita em metros por segundo ao quadrado (m/s^2).

Abaixo das caixas dos acelerômetros existe um indicador gráfico do afundamento nas trilhas de roda. Como foram usados três laser apenas, a presença de afundamento é indicada pelo fato das duas extremidades estarem mais baixas que o centro. Este indicador é atualizado a cada 10 metros percorridos pelo veículo e ele ajuda na determinação do posicionamento do veículo na faixa.

Abaixo do indicador gráfico do afundamento das trilhas de roda, existem duas outras caixas: o hodômetro e o indicador do QI. O programa indica preliminarmente a irregularidade em Quociente de Irregularidade (QI), visando proporcionar ao operador o acompanhamento do funcionamento do perfilômetro. No processamento com o *software Cibershell,* explicado mais adiante, o IRI é calculado a partir dos perfis longirtudinais gravados nos arquivos. A caixa do hodômetro indica o posicionamento atual do veículo e ainda a distância total percorrida desde a entrada no programa e a velocidade atual do veículo.

A caixa de QI indica um valor preliminar de irregularidade em QI (cont/km) a cada 200 metros percorridos. Normalmente este valor é indicado com um 'atraso' de 1 km, devido aos cálculos e aos filtros usados.

Abaixo está o campo de observações. De grande importância durante os levantamentos, pois é nele que se registra qualquer acontecimento durante a operação que possa influir no resultado. Normalmente registram-se: lombadas, buracos, problemas no sistema, obras de arte, ultrapassagens, paradas, etc. Além deste registro é neste campo que também se deve registrar, sempre que possível, os marcos quilométricos da rodovia. O operador deve adotar para si um referencial de acordo com seu posicionamento sentado no veículo para anotar no campo de observações sempre que passar por um marco quilométrico, o que deve ser feito da seguinte forma: em letras minúsculas digitar a letra k, depois a letra m, o número do quilômetro, seguido de um *enter*. Tudo sem espaço. Por exemplo: km12.

O sistema adota como referência o momento em que se pressionou a letra “k”, portanto, muita atenção ao passar dos marcos quilométricos. Na dúvida, não registre. Após registrar dois marcos quilométricos, o hodômetro atual passa a funcionar, facilitando o acompanhamento e registro dos próximos marcos. Se registrar um marco errado e quiser desconsiderá-lo, digite: *undo* e *enter*, assim o último marco será desconsiderado.

Por fim, ainda na tela no *logger* existem dois outros números e dois outros botões. Os números são aqueles abaixo do percentual de medidas fora de curso dos módulos. O primeiro significa o número total de medidas registradas até o momento em cada um dos componentes. O segundo indica a velocidade com a qual o sistema está gravando a medida de cada um dos componentes. Esta medida não deve variar muito durante os levantamentos. Variações bruscas pode ser sinal de mau funcionamento do equipamento.

Os botões que restam são: *reset* e gravar. O botão *reset* serve para restabelecer contato entre o computador e o *Hub,* contato que pode se perder por falha de alimentação, por exemplo. Não deve ser apertado com o equipamento em Gravação.

O Botão “**gravar”**, serve para iniciar a gravação dos dados e durante a gravação serve para parar.

Para a coleta e a gravação dos dados dos perfis longitudinal e transversal de uma faixa de rolamento, são adotados os seguintes procedimentos:

- Com o equipamento devidamente montado, testado e preparado, liga-se o sistema, o *Ciberlogger* é carregado e a distância entre os módulos é inserida. Dirige-se ao trecho a ser levantado e pelo menos 100 metros antes de iniciar o trecho pressiona-se o botão “**gravar**” e os dados informativos são preenchidos: Rodovia, Sentido, Faixa, km inicial e final (aproximados) e em seguida pressiona-se OK, para começar a gravar os dados.

- Se houver alguma marcação de início do trecho escreve-se algo no campo de observações assim que passar por ela. Basta manter uma velocidade igual ou maior que 30 km/h, e o veículo na faixa de rolamento em avaliação e acompanhar o funcionamento do sistema na tela do programa. Todas as

observações referentes ao funcionamento do sistema e à rodovia são anotadas, além do maior número de marcos quilométricos possível.

- Durante o levantamento, caso algum laser apresente muitas medidas fora de curso, pode-se parar o veículo, sem parar a gravação. Sinaliza-se no campo de observações que o veículo será parado com segurança, limpa-se a parte inferior dos sensores, checando também as conexões. Se for necessário reconectar algum módulo, pode ser necessário apertar o botão "*reset*" no *Ciberlogger* para restabelecer a conexão do sistema.
- Finalizado o trecho, é feita uma observação e em seguida pressionado o botão "**parar**". O software leva alguns segundos até fechar o arquivo.

III.5 Processamento dos dados utilizando o programa *Cibershell*

Antes de rodar o *Cibershell,* as configurações regionais do Windows têm que ser alteradas, para que o separador decimal seja o ponto e o separador de dígitos seja a vírgula. Os arquivos de dados são copiados para um diretório. Inicia-se o processamento

- Na tela inicial do programa, Figura 5.19, aperta-se o botão que tem a seta para escolher o diretório onde estão gravados os dados gerados no campo.
- Deve haver sempre um arquivo com a extensão *obs* e outro com a extensão *fix* para cada nome de arquivo.

  Obs – Armazena todas as observações digitadas pelo usuário durante o levantamento. Estas, por sua vez, são arquivadas junto do pulso do hodômetro, presente no momento que se apertou a primeira letra da caixa de observações do *logger*.

  Fix – Esse arquivo traz as medições feitas por cada um dos módulos, ao lado do pulso do hodômetro e ao lado também das medições dos dois acelerômetros já integradas duas vezes (ou seja, já em unidade de espaço). É este o arquivo usado no *Cibershell* para cálculo do IRI.

  Outros arquivos são gerados:

Log – Trata-se de um arquivo reserva, não é usado no processamento. Ele contém as medidas dos módulos, hodômetro e as medidas dos acelerômetros ainda não integradas. Trata-se de um arquivo de emergência, que numa eventualidade pode ser usado.

Cfg – arquivo criado pelo *Cibershell* após a inclusão ou determinação do coeficiente de calibração do hodômetro. Em síntese, este arquivo tem o mesmo conteúdo do arquivo *obs*, só que enquanto o *obs* está referenciado nos pulsos, este já está referenciado em metros, além de conter qual foi o coeficiente usado nesta conversão de pulsos para metros.

Erd – Gera um arquivo padrão com o perfil levantado.

Ao retornar irá aparecer na parte superior do programa o nome de todos os arquivos da pasta. Aberto o arquivo ative a aba "**Obs"**, seleciona-se o arquivo e aperta-se o botão **ObsParser**. Aparece outra tela. Esta é a parte do programa que possibilita ver as observações, acertar a calibração do hodômetro de acordo com os marcos quilométricos inseridos no campo e ainda possibilita a realização de acertos em uma das medições longitudinais para que seja possível fazer uma correção da posição de um marco de acordo com uma marcação secundária.

O coeficiente de calibração (constante K) é utilizado na construção do perfil longitudinal. Para descrever um perfil é preciso ter deslocamento longitudinal no eixo X e não pulsos. Assim, o *logger* usa o coeficiente que foi gravado no arquivo "**cfg**" para gerar o perfil e a partir do perfil é feito o cálculo do IRI.

A constante K é calculada através da seguinte expressão: (extensão conhecida / (pulso final - pulso inicial)), conforme mostrado na Tabela 5.15 do Capítulo 5.

Caso se queira colocar um coeficiente de calibração manualmente, basta fazê-lo no campo adequado, na unidade de km/pulso. Assim que for colocado um valor qualquer no campo, os resíduos em relação a cada um dos marcos quilométricos registrados serão

mostrados tanto na parte superior, quanto na caixa esquerda da tela. Para voltar com o valor calculado pelo posicionamento dos marcos, basta apertar o botão regressão.

Finalizado o ajuste do coeficiente de calibração do hodômetro, nesta mesma parte do programa ainda é possível fazer ajustes no posicionamento longitudinal de algum dos marcos. Essa opção só é recomendada em caso de obras ou intervenções que não usarão os marcos quilométricos como referência e sim um estaqueamento auxiliar. Por exemplo, se na rodovia existe uma marcação secundária (estaqueamento) que é diferente dos marcos quilométricos, basta medir a diferença de distância de um marco para a estaca correspondente. Como exemplo, suponha que o marco do km 36 está na verdade na posição 35+750 em relação ao estaqueamento. Para corrigir isto, clique sobre a coluna KM na posição da observação do km 36 e subtraia 250 metros da medida mostrada digitando-a novamente. Se estiver marcando 36.020, digite em seu lugar 35.770 e pronto, todo o trecho terá sido ajustado para este *offset* e naturalmente os resíduos em relação à calibração aumentarão nessa proporção, o que não deve causar espanto.

Finalizado os ajustes de um arquivo, basta fechar a janela e aceitar a opção de gravação do arquivo "cfg". O programa volta para a tela anterior e marca um asterisco ao lado do arquivo já processado neste quesito.

Ative a aba "**Nome"**. Ela permite que os arquivos sejam automaticamente renomeados para passarem a indicar exatamente o km inicial e final, o que auxilia muito na manutenção dos dados gravados. Os arquivos mostrados são selecionados e aperta-se o botão "**acerta nomes**". O programa vai verificar o nome adequado para o arquivo e perguntará se pode fazer a troca. Normalmente a troca é recomendável.

Renomeados todos os arquivos, basta seguir para a próxima Aba: "**cortes"**. Esta parte do programa serve para que possam ser extraídos os trechos que realmente se queria medir dentro dos trechos avaliados. Por exemplo: Foram gravados 100 km de faixa num arquivo, mas serão úteis somente alguns sub-trechos, dentro dele. Se este for o caso, selecione o arquivo e aperte o botão "*fixcut*". Seleciona-se o trecho a ser cortado para análise. Feita a seleção aperte o botão "**corta**". O procedimento pode ser repetido quantas vezes forem necessárias em cada arquivo, desde que seja feito um corte por vez.

Em seguida é aberta a próxima Aba que fornece os "**relatórios**". Lembremos que no equipamento utilizado nesta pesquisa com três laser, os módulos são assim numerados: L1, L2 e L5, sendo que os módulos L1 e L5 são aqueles que contêm os acelerômetros.

Os segmentos cortados já estão todos selecionados. A seguir são determinados quais são os módulos para os quais se quer calcular a irregularidade e as trilhas de roda, o intervalo e os afundamentos conforme mostrado na Figura 5.20 do Capítulo 5. Em condições normais de operação, os escolhidos devem ser L1 e L5, que estavam sobre as trilhas de roda.

Para calcular também o afundamento médio das duas trilhas de roda, escreve-se na primeira caixinha "central ou esquerda" o número 125. Isso significa que foram usados os módulos 1, 2 e 5 e que o cálculo será uma média do afundamento das duas trilhas. A última opção da tela é para gerar um arquivo padrão de extensão *erd,* com o perfil levantado. Agora é só apertar o botão "**gerar**" e passar para a aba seguinte *Excel*. Alguns dados são informados para o relatório. Preenchidos os campos, conforme Figura 5.20, mantidas as seleções dos trechos e dos arquivos é só pressionar o botão "exportar".

Os arquivos com os resultados foram gerados. O *Cibershell* deve ser fechado e com o auxílio do *Excel* são visualizados os arquivos gerados no mesmo diretório dos dados, conforme exemplos apresentados nas Tabelas 5.16 e 5.17 do Capítulo 5, para IRI e ATR, respectivamente. As planilhas contendo os resultados da irregularidade contêm como padrão duas colunas, uma para o resultado calculado de cada módulo (IRI de cada trilha de roda) e ainda a média das colunas para que o usuário tenha uma noção de qual seria a irregularidade característica do trecho. A quarta coluna contém as observações registradas em campo, muito úteis para a interpretação dos resultados.

As planilhas contendo os resultados de ATR possuem 3 (três) colunas: a primeira que traz a média dos afundamentos nas duas trilhas de roda, a segunda que traz o desvio padrão da média e a terceira que tem o número de medidas N levadas em conta no cálculo da média (para este cálculo não são usadas todas as medidas feitas). Em ambas as planilhas, algumas medidas podem ter sido substituídas automaticamente por hífens.

Os hífens estarão presentes nos relatórios de ATR, quando a média do afundamento for um valor negativo menor que -2,0mm. Isto é feito para auxiliar nas análises e nos

processamentos das informações. A ocorrência destes valores negativos pode tanto ser uma característica da pista (o que não acontece com muita freqüência), como também um problema operacional devido a um posicionamento incorreto sobre a faixa de rolamento.

Já no Excel, com os arquivos processados devidamente abertos, as observações anotadas são verificadas. As medidas que não foram obtidas de forma confiável, não devem ser consideradas como válidas e sim, substituídas por um hífen. Devem ser observadas como medidas não confiáveis: os trechos com lombadas, as mudanças de faixa durante uma ultrapassagem e os trechos onde o veículo parou ou onde a velocidade do veículo foi menor do que 30 km/h.

ANEXO II

PLANILHA DE CÁLCULO DE IRI DE UM TRECHO COM 50,0m PARA UM ALGORITMO COM dx = 0,5 m.

PLANILHA DE CÁLCULO DE IRI DE UM TRECHO COM 50,0 m PARA UM ALGORITMO COM dx = 0,5 m.

		Matriz para 0.5m			0,9881727	2,13E-02	-2,52E-02	9,92E-04	3,70E-02			
					-0,928516	0,9001616	-3,391369	6,28E-02	4,319885			
		dx	0,5		6,39E-02	6,62E-03	0,2402896	9,86E-03	0,6958473			
		a	22		3,743294	0,4186779	-46,67883	-0,1145251	42,93555			
Deslocamento (m)	**Altura (mm)**	**z1p**	**z2p**	**z3p**	**z4p**	**yp**	**z1**	**z2**	**z3**	**z4**	**soma**	**IRI**
0,0	-66,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	-
0,5	-67,6	-1,35	0,00	-1,35	0,00	-2,00	-1,37	-2,83	-1,80	-28,10	0,43	0,11
1,0	-68,6	-1,37	-2,83	-1,80	-28,10	-2,00	-1,47	-5,57	-2,21	-4,90	1,17	0,23
1,5	-73,4	-1,47	-5,57	-2,21	-4,90	-9,60	-1,88	-37,94	-7,39	-316,40	6,68	1,11
2,0	-77,4	-1,88	-37,94	-7,39	-316,40	-8,00	-3,09	-61,78	-10,83	14,79	14,43	2,06
2,5	-80,3	-3,09	-61,78	-10,83	14,79	-5,80	-4,29	-40,13	-7,10	217,57	17,24	2,15
3,0	-83,8	-4,29	-40,13	-7,10	217,57	-7,00	-4,96	-24,64	-4,97	-26,95	17,25	1,92
3,5	-90,8	-4,96	-24,64	-4,97	-26,95	-14,00	-5,84	-62,89	-11,68	-394,88	23,09	2,31
4,0	-94,3	-5,84	-62,89	-11,68	-394,88	-7,00	-7,47	-66,61	-12,36	241,76	27,98	2,54
4,5	-96,6	-7,47	-66,61	-12,36	241,76	-4,60	-8,42	-15,78	-4,70	295,99	31,69	2,64
5,0	-98,3	-8,42	-15,78	-4,70	295,99	-3,40	-8,37	13,46	-1,22	1,61	38,84	2,99
5,5	-97,4	-8,37	13,46	-1,22	1,61	1,80	-7,88	31,90	0,53	108,32	47,26	3,38
6,0	-95,5	-7,88	31,90	0,53	108,32	3,80	-6,88	57,46	3,55	109,85	57,68	3,85
6,5	-95,7	-6,88	57,46	3,55	109,85	-0,40	-5,57	51,25	1,60	-197,03	64,85	4,05
7,0	-93,6	-5,57	51,25	1,60	-197,03	4,20	-4,49	51,65	1,35	128,89	70,69	4,16
7,5	-92,1	-4,49	51,65	1,35	128,89	3,00	-3,13	67,15	3,74	55,99	77,56	4,31
8,0	-93,2	-3,13	67,15	3,74	55,99	-2,20	-1,79	44,69	0,16	-258,94	79,51	4,18
8,5	-91,8	-1,79	44,69	0,16	-258,94	2,80	-0,97	37,17	-0,38	154,27	80,10	4,00
9,0	-89,8	-0,97	37,17	-0,38	154,27	4,00	0,14	62,64	4,40	183,95	84,35	4,02
9,5	-88,9	0,14	62,64	4,40	183,95	1,80	1,61	60,67	4,55	-122,24	87,29	3,97
10,0	-86,6	1,61	60,67	4,55	-122,24	4,60	2,82	49,89	3,59	30,71	88,06	3,83
10,5	-84,1	2,82	49,89	3,59	30,71	5,00	3,97	53,64	5,16	74,93	89,25	3,72
11,0	-81,4	3,97	53,64	5,16	74,93	5,40	5,21	55,15	6,34	19,96	90,38	3,62
11,5	-77,4	5,21	55,15	6,34	19,96	8,00	6,48	59,10	7,99	87,67	91,89	3,53
12,0	-72,1	6,48	59,10	7,99	87,67	10,60	7,94	71,40	10,96	121,32	94,91	3,52
12,5	-70,1	7,94	71,40	10,96	121,32	4,00	9,36	44,62	7,59	-294,34	96,68	3,45
13,0	-68,3	9,36	44,62	7,59	-294,34	3,60	9,85	2,79	2,32	-112,49	104,20	3,59
13,5	-66,4	9,85	2,79	2,32	-112,49	3,80	9,76	-5,15	2,74	105,79	111,22	3,71
14,0	-66,1	9,76	-5,15	2,74	105,79	0,60	9,59	-13,75	2,71	-79,85	118,10	3,81

PLANILHA DE CÁLCULO DE IRI DE UM TRECHO COM 50,0 m PARA UM ALGORITMO COM dx = 0,5 m.

		Matriz para 0.5m			0,9881727	2,13E-02	-2,52E-02	9,92E-04	3,70E-02			
					-0,928516	0,9001616	-3,391369	6,28E-02	4,319885			
		dx	0,5		6,39E-02	6,62E-03	0,2402896	9,86E-03	0,6958473			
		a	22		3,743294	0,4186779	-46,67883	-0,1145251	42,93555			
Deslocamento (m)	**Altura (mm)**	**z1p**	**z2p**	**z3p**	**z4p**	**yp**	**z1**	**z2**	**z3**	**z4**	**soma**	**IRI**
14,5	-67,9	9,59	-13,75	2,71	-79,85	-3,60	8,90	-51,03	-2,12	-241,69	129,13	4,04
15,0	-70,4	8,90	-51,03	-2,12	-241,69	-5,00	7,34	-83,79	-6,14	-76,06	142,61	4,32
15,5	-72,3	7,34	-83,79	-6,14	-76,06	-3,80	5,41	-82,61	-4,96	124,63	152,98	4,50
16,0	-69,1	5,41	-82,61	-4,96	124,63	6,40	4,07	-27,11	4,29	477,50	153,20	4,38
16,5	-68,4	4,07	-27,11	4,29	477,50	1,40	3,87	-6,70	6,80	-190,97	156,13	4,34
17,0	-68,9	3,87	-6,70	6,80	-190,97	-1,00	3,28	-48,98	-0,74	-326,60	160,15	4,33
17,5	-68,7	3,28	-48,98	-0,74	-326,60	0,40	1,91	-63,39	-3,24	81,07	165,29	4,35
18,0	-65,5	1,91	-63,39	-3,24	81,07	6,40	0,94	-15,12	4,18	397,16	168,54	4,32
18,5	-65,0	0,94	-15,12	4,18	397,16	1,00	0,93	0,61	5,58	-200,40	173,18	4,33
19,0	-65,5	0,93	0,61	5,58	-200,40	-1,00	0,55	-36,13	-1,27	-276,56	175,01	4,27
19,5	-67,2	0,55	-36,13	-1,27	-276,56	-3,40	-0,59	-60,79	-5,60	-68,13	180,02	4,29
20,0	-66,0	-0,59	-60,79	-5,60	-68,13	2,40	-1,71	-29,08	-0,79	344,69	180,95	4,21
20,5	-64,5	-1,71	-29,08	-0,79	344,69	3,00	-1,84	12,69	5,00	107,51	187,78	4,27
21,0	-63,3	-1,84	12,69	5,00	107,51	2,40	-1,48	13,31	3,90	-144,04	193,16	4,29
21,5	-64,0	-1,48	13,31	3,90	-144,04	-1,40	-1,47	-14,96	-1,46	-225,50	193,16	4,20
22,0	-62,7	-1,47	-14,96	-1,46	-225,50	2,60	-1,86	-10,06	-0,96	194,06	194,07	4,13
22,5	-61,0	-1,86	-10,06	-0,96	194,06	3,40	-1,71	22,80	3,86	157,37	199,64	4,16
23,0	-61,8	-1,71	22,80	3,86	157,37	-1,60	-1,21	11,98	1,41	-263,94	202,26	4,13
23,5	-64,3	-1,21	11,98	1,41	-263,94	-5,00	-1,42	-31,05	-5,74	-249,71	206,58	4,13
24,0	-65,0	-1,42	-31,05	-5,74	-249,71	-1,40	-2,22	-28,89	-5,11	218,19	209,47	4,11
24,5	-66,5	-2,22	-28,89	-5,11	218,19	-3,00	-2,57	-5,86	-1,50	64,46	210,55	4,05
25,0	-67,5	-2,57	-5,86	-1,50	64,46	-2,00	-2,64	-2,40	-1,32	-35,46	211,87	4,00
25,5	-68,5	-2,64	-2,40	-1,32	-35,46	-2,00	-2,74	-6,10	-2,24	-31,14	212,36	3,93
26,0	-68,6	-2,74	-6,10	-2,24	-31,14	-0,20	-2,82	1,83	-1,20	86,87	213,98	3,89
26,5	-69,3	-2,82	1,83	-1,20	86,87	-1,40	-2,68	7,74	-0,57	-23,80	216,08	3,86
27,0	-71,7	-2,68	7,74	-0,57	-23,80	-4,80	-2,67	-10,83	-3,83	-183,38	217,25	3,81
27,5	-73,9	-2,67	-10,83	-3,83	-183,38	-4,40	-3,12	-24,80	-6,03	-3,55	220,16	3,80
28,0	-75,4	-3,12	-24,80	-6,03	-3,55	-3,00	-3,57	-12,15	-3,94	131,18	220,53	3,74
28,5	-78,3	-3,57	-12,15	-3,94	131,18	-5,80	-3,77	-11,09	-4,00	-98,80	220,75	3,68

PLANILHA DE CÁLCULO DE IRI DE UM TRECHO COM 50,0 m PARA UM ALGORITMO COM dx = 0,5 m.

		Matriz para 0.5m			0,9881727	2,13E-02	-2,52E-02	9,92E-04	3,70E-02				
					-0,928516	0,9001616	-3,391369	6,28E-02	4,319885				
		dx	0,5		6,39E-02	6,62E-03	0,2402896	9,86E-03	0,6958473				
		a	22		3,743294	0,4186779	-46,67883	-0,1145251	42,93555				
Deslocamento (m)	**Altura (mm)**	**z1p**	**z2p**	**z3p**	**z4p**	**yp**	**z1**	**z2**	**z3**	**z4**	**soma**	**IRI**
29,0	-78,1	-3,77	-11,09	-4,00	-98,80	0,40	-3,95	2,59	-1,97	196,26	222,73	3,65
29,5	-79,3	-3,95	2,59	-1,97	196,26	-2,40	-3,69	14,64	-0,44	-47,22	225,97	3,64
30,0	-80,6	-3,69	14,64	-0,44	-47,22	-2,60	-3,46	3,90	-2,52	-93,24	226,92	3,60
30,5	-82,8	-3,46	3,90	-2,52	-93,24	-4,40	-3,53	-9,59	-4,78	-71,94	228,17	3,57
31,0	-82,7	-3,53	-9,59	-4,78	-71,94	0,20	-3,64	7,22	-2,01	222,82	229,80	3,54
31,5	-81,6	-3,64	7,22	-2,01	222,82	2,20	-3,09	40,18	3,06	152,10	235,95	3,57
32,0	-80,2	-3,09	40,18	3,06	152,10	2,80	-2,02	50,30	4,25	-34,83	242,22	3,62
32,5	-79,4	-2,02	50,30	4,25	-34,83	1,60	-1,01	37,46	2,00	-112,32	245,22	3,61
33,0	-78,0	-1,01	37,46	2,00	-112,32	2,80	-0,26	32,93	1,50	51,85	246,98	3,58
33,5	-74,6	-0,26	32,93	1,50	51,85	6,80	0,71	57,41	5,81	228,67	252,07	3,60
34,0	-72,9	0,71	57,41	5,81	228,67	3,40	2,13	60,38	6,44	-124,51	256,38	3,61
34,5	-72,3	2,13	60,38	6,44	-124,51	1,20	3,15	27,89	1,69	-201,64	257,84	3,58
35,0	-72,1	3,15	27,89	1,69	-201,64	0,40	3,48	5,51	-0,92	-15,17	262,24	3,59
35,5	-71,9	3,48	5,51	-0,92	-15,17	0,40	3,58	5,62	0,17	77,11	265,65	3,59
36,0	-71,5	3,58	5,62	0,17	77,11	0,80	3,76	9,47	1,62	33,48	267,79	3,57
36,5	-68,8	3,76	9,47	1,62	33,48	5,40	4,11	24,96	4,78	170,29	268,46	3,53
37,0	-68,5	4,11	24,96	4,78	170,29	0,60	4,66	15,73	3,67	-191,06	269,45	3,50
37,5	-68,3	4,66	15,73	3,67	-191,06	0,40	4,67	-12,90	-0,32	-108,37	274,44	3,52
38,0	-66,2	4,67	-12,90	-0,32	-108,37	4,20	4,40	-3,52	1,99	219,85	276,85	3,50
38,5	-66,1	4,40	-3,52	1,99	219,85	0,20	4,45	0,67	3,04	-94,47	278,26	3,48
39,0	-65,5	4,45	0,67	3,04	-94,47	1,20	4,28	-14,60	0,92	-62,78	281,62	3,48
39,5	-65,4	4,28	-14,60	0,92	-62,78	0,20	3,84	-23,33	-0,08	-17,39	285,54	3,48
40,0	-63,8	3,84	-23,33	-0,08	-17,39	3,20	3,41	-11,56	2,13	147,80	286,82	3,46
40,5	-64,6	3,41	-11,56	2,13	147,80	-1,60	3,15	-18,41	1,00	-177,00	288,98	3,44
41,0	-63,8	3,15	-18,41	1,00	-177,00	1,60	2,58	-27,08	-0,31	46,55	291,87	3,43
41,5	-64,0	2,58	-27,08	-0,31	46,55	-0,40	2,01	-24,52	0,09	-9,55	293,80	3,42
42,0	-64,9	2,01	-24,52	0,09	-9,55	-1,80	1,39	-32,62	-1,36	-83,17	296,55	3,41
42,5	-66,2	1,39	-32,62	-1,36	-83,17	-2,60	0,53	-42,51	-3,08	-47,16	300,16	3,41
43,0	-65,4	0,53	-42,51	-3,08	-47,16	1,60	-0,29	-24,35	-0,34	202,21	300,22	3,37

PLANILHA DE CÁLCULO DE IRI DE UM TRECHO COM 50,0 m PARA UM ALGORITMO COM dx = 0,5 m.

		Matriz para 0.5m			0,9881727	2,13E-02	-2,52E-02	9,92E-04	3,70E-02				
					-0,928516	0,9001616	-3,391369	6,28E-02	4,319885				
		dx	0,5		6,39E-02	6,62E-03	0,2402896	9,86E-03	0,6958473				
		a	22		3,743294	0,4186779	-46,67883	-0,1145251	42,93555				
Deslocamento (m)	**Altura (mm)**	**z1p**	**z2p**	**z3p**	**z4p**	**yp**	**z1**	**z2**	**z3**	**z4**	**soma**	**IRI**
43,5	-65,0	-0,29	-24,35	-0,34	202,21	0,80	-0,56	-4,35	2,29	15,77	303,07	3,37
44,0	-63,0	-0,56	-4,35	2,29	15,77	4,00	-0,54	7,11	3,42	59,11	307,04	3,37
44,5	-62,5	-0,54	7,11	3,42	59,11	1,00	-0,37	3,32	2,11	-122,74	309,52	3,36
45,0	-62,1	-0,37	3,32	2,11	-122,74	0,80	-0,45	-8,08	-0,15	-50,29	309,82	3,33
45,5	-62,5	-0,45	-8,08	-0,15	-50,29	-0,80	-0,69	-12,98	-1,17	-26,74	310,30	3,30
46,0	-61,8	-0,69	-12,98	-1,17	-26,74	1,40	-0,90	-2,71	0,30	109,79	311,50	3,28
46,5	-57,1	-0,90	-2,71	0,30	109,79	9,40	-0,50	44,89	7,62	372,53	319,62	3,33
47,0	-57,7	-0,50	44,89	7,62	372,53	-1,20	0,60	33,24	4,94	-432,97	323,96	3,34
47,5	-58,7	0,60	33,24	4,94	-432,97	-2,00	0,67	-23,20	-4,22	-250,52	328,85	3,36
48,0	-59,6	0,67	-23,20	-4,22	-250,52	-1,80	-0,04	-30,71	-4,85	141,09	333,65	3,37
48,5	-60,6	-0,04	-30,71	-4,85	141,09	-2,00	-0,51	-10,94	-1,37	111,24	334,52	3,35
49,0	-62,1	-0,51	-10,94	-1,37	111,24	-3,00	-0,70	-10,70	-1,42	-84,03	335,24	3,32
49,5	-65,1	-0,70	-10,70	-1,42	-84,03	-6,00	-1,19	-35,35	-5,46	-188,59	339,51	3,33
50,0	40,0	-1,19	-35,35	-5,46	-188,59	210,20	5,81	884,00	142,78	9282,35	476,49	4,63
											IRI total em 50 metros:	**4,63**

ANEXO III

TABELAS COM OS RESUMOS DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DE REGRESSÃO DOS MODELOS ESTATÍSTICOS

Tabela II.1 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito TF para os 44 trechos da RMF considerando três tipos de revestimento

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.876847703
R-Quadrado	0.768861894
R-quadrado ajustado	0.74560608
Erro padrão	8.1121623
Observações	44

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	9412.7929	9412.793	143.035962
Resíduo	43	2829.7086	65.80718	
Total	44	12242.502		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	1.591982	0.13311	11.9597	2.885E-15	1.323537	1.86042

Tabela II.2 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito TB para os 44 trechos da RMF considerando três tipos de revestimento

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.645892105
R-Quadrado	0.417176611
R-quadrado ajustado	0.403299864
Erro padrão	0.915679204
Observações	44

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	25.206873	25.20687	30.063
Resíduo	43	35.215673	0.838468	
Total	44	60.422546		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	1.061132979	0.1532977	6.922043	1.88E-08	0.751766	1.3705
Variável X 1	0.765843552	0.1396767	5.482973	2.19E-06	0.483965	1.047723

Tabela II.3 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito REM para os 44 trechos da RMF considerando três tipos de revestimento

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.917827021
R-Quadrado	0.842406441
R-quadrado ajustado	0.819150627
Erro padrão	3.132583928
Observações	44

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	2255.5741	2255.574	229.8538
Resíduo	43	421.96253	9.813082	
Total	44	2677.5366		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	1.689721013	0.1114523	15.16093	7.33E-19	1.464956	1.914486

Tabela II.4 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito AFUND para os 44 trechos da RMF considerando três tipos de revestimento

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.952066849
R-Quadrado	0.906431286
R-quadrado ajustado	0.883175472
Erro padrão	0.299632943
Observações	44

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	37.398295	37.39829	416.5553
Resíduo	43	3.8605357	0.08978	
Total	44	41.25883		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	1.843866855	0.0903427	20.40969	9.6E-24	1.661673	2.02606

Tabela II.5 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito DES para os 44 trechos da RMF considerando três tipos de revestimento

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.913386321
R-Quadrado	0.834274571
R-quadrado ajustado	0.830328727
Erro padrão	1.002745113
Observações	44

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	212.59363	212.5936	211.4312
Resíduo	42	42.230906	1.005498	
Total	43	254.82454		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0.22621448	0.1561636	2.448574	0.015488	0.08893	0.341365
Variável X 1	2.088762559	0.1436496	14.54068	5.4E-18	1.79886	2.378659

Tabela II.6 Resumo dos resultados da equação de evolução dos defeitos (TF + TB) para os 44 trechos da RMF considerando três tipos de revestimento

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.884553048
R-Quadrado	0.782434095
R-quadrado ajustado	0.759178281
Erro padrão	8.318838148
Observações	44

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	10701.65	10701.65	154.641262
Resíduo	43	2975.7319	69.20307	
Total	44	13677.382		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	1.611867991	0.1296184	12.4354	7.7896E-16	1.3504675	1.873268

Tabela II.7 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito TF para os 32 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,869059086
R-Quadrado	0,755263695
R-quadrado ajustado	0,721930361
Erro padrão	4,195709977
Observações	31

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	1629,7928	1629,793	92,580914
Resíduo	30	528,11947	17,60398	
Total	31	2157,9122		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	1,06794793	0,1109914	9,621898	1,114E-10	0,841273243	1,294623

Tabela II.8 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito TB para os 32 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,665934944
R-Quadrado	0,44346935
R-quadrado ajustado	0,424918328
Erro padrão	0,863972446
Observações	32

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	17,844137	17,84414	23,90539
Resíduo	30	22,393452	0,746448	
Total	31	40,237589		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	1,135287235	0,1691074	6,713409	1,94E-07	0,789924	1,480651
Variável X 1	0,668170807	0,1366594	4,889314	3,18E-05	0,389075	0,947267

Tabela II.9 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito REM para os 32 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,865536574
R-Quadrado	0,749153561
R-quadrado ajustado	0,714670802
Erro padrão	1,386766272
Observações	30

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	166,55875	166,5587	86,60858
Resíduo	29	55,7705	1,923121	
Total	30	222,32925		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	1,991402637	0,2139827	9,306373	3,29E-10	1,553759	2,429046

Tabela II.10 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito AFUND para os 32 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,943879807
R-Quadrado	0,890909091
R-quadrado ajustado	0,858651026
Erro padrão	0,196747751
Observações	32

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	9,8	9,8	253,1667
Resíduo	31	1,2	0,03871	
Total	32	11		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	1,4	0,0879883	15,91121	1,83E-16	1,220547	1,579453

Tabela II.11 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito DES para os 32 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,687033608
R-Quadrado	0,472015179
R-quadrado ajustado	0,428536918
Erro padrão	0,964397751
Observações	24

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	19,123824	19,12382	20,56186
Resíduo	23	21,39145	0,930063	
Total	24	40,515274		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	2,524798616	0,5567953	4,534519	0,000149	1,37298	3,676617

Tabela II.12 Resumo dos resultados da equação de evolução dos defeitos (TF + TB) para os 32 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,891060821
R-Quadrado	0,793989386
R-quadrado ajustado	0,759506627
Erro padrão	4,527513682
Observações	30

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	2291,0926	2291,093	111,769446
Resíduo	29	594,45302	20,49838	
Total	30	2885,5456		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	1,170235719	0,1106909	10,57211	1,8404E-11	0,943847474	1,396624

Tabela II.13 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito TF para os 10 trechos da RMF com revestimento em TSD

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,977356235
R-Quadrado	0,95522521
R-quadrado ajustado	0,844114099
Erro padrão	6,848188811
Observações	10

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	9004,6364	9004,636	192,005968
Resíduo	9	422,07921	46,89769	
Total	10	9426,7156		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	2,210997627	0,1595625	13,85662	2,2415E-07	1,850042109	2,571953

Tabela II.14 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito TB para os 10 trechos da RMF com revestimento em TSD

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,697943263
R-Quadrado	0,487124799
R-quadrado ajustado	0,423015398
Erro padrão	0,470696964
Observações	10

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	1,6834543	1,683454	7,598337
Resíduo	8	1,7724451	0,221556	
Total	9	3,4558993		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0,53140277	0,1664165	3,193209	0,012742	0,147646	0,91516
Variável X 1	1,025747975	0,3721186	2,756508	0,024808	0,167641	1,883855

Tabela II.15 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito REM para os 10 trechos da RMF com revestimento em TSD

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,993884859
R-Quadrado	0,987807113
R-quadrado ajustado	0,876696002
Erro padrão	1,81324438
Observações	10

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	2397,2913	2397,291	729,1353
Resíduo	9	29,590697	3,287855	
Total	10	2426,882		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	2,026067818	0,0750326	27,00251	6,35E-10	1,856332	2,195803

Tabela II.16 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito AFUND para os 10 trechos da RMF com revestimento em TSD

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,987862766
R-Quadrado	0,975872845
R-quadrado ajustado	0,864761734
Erro padrão	0,320256274
Observações	10

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	37,335754	37,33575	364,0237
Resíduo	9	0,9230767	0,102564	
Total	10	38,25883		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	2,160316925	0,1132277	19,0794	1,38E-08	1,904178	2,416456

Tabela II.17 Resumo dos resultados da equação de evolução do defeito DES para os 10 trechos da RMF com revestimento em TSD

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,997049885
R-Quadrado	0,994108474
R-quadrado ajustado	0,993372033
Erro padrão	0,373995866
Observações	10

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	188,81199	188,812	1349,882
Resíduo	8	1,1189833	0,139873	
Total	9	189,93097		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0,256227384	0,1322275	1,937777	0,008865	0,04869	0,561145
Variável X 1	2,172625056	0,0591339	36,74075	3,3E-10	2,036262	2,308988

Tabela II.18 Resumo dos resultados da equação de evolução dos defeitos (TF +TB) para os 10 trechos da RMF com revestimento em TSD

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,979673053
R-Quadrado	0,959759291
R-quadrado ajustado	0,84864818
Erro padrão	6,619687312
Observações	10

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	9406,1989	9406,199	214,65411
Resíduo	9	394,38234	43,82026	
Total	10	9800,5813		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Variável X 1	2,215691683	0,1512306	14,65108	1,3837E-07	1,873584261	2,557799

Tabela II.19 Resumo dos resultados do modelo IRI_{int} x IRI_{ext} para SPN nos 72 trechos.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.949797805
R-Quadrado	0.90211587
R-quadrado ajustado	0.900717526
Erro padrão	0.287450225
Observações	72

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	53.30566738	53.3056674	645.131
Resíduo	70	5.78393422	0.08262763	
Total	71	59.0896016		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0.412224407	0.107812	3.82353695	0.00028	0.1972	0.627249
Variável X 1	0.81239461	0.031984	25.3994341	4.7E-37	0.748603	0.876186

Tabela II.20 Resumo dos resultados do modelo IRI_I x IRI_E para SPN nos 42 trechos.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.935969
R-Quadrado	0.876038
R-quadrado ajustado	0.872939
Erro padrão	0.236589
Observações	42

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	15.82271	15.8227148	282.679
Resíduo	40	2.238968	0.0559742	
Total	41	18.06168		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0.574265	0.158677	3.61908871	0.00082	0.253568	0.894963
Variável X 1	0.792949	0.047163	16.8130519	9.8E-20	0.69763	0.888269

Tabela II.21 Resumo dos resultados do modelo $IRI_{médio}$ SLD x $IRI_{médio}$ SLE nos 42 trechos.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.962141891
R-Quadrado	0.925717019
R-quadrado ajustado	0.923859944
Erro padrão	0.17884276
Observações	42

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	15.94379291	15.94379	498.4814
Resíduo	40	1.279389318	0.031985	
Total	41	17.22318223		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0.6770635	0.114486821	5.913899	6.25E-07	0.445677	0.90845
Variável X 1	0.7656079	0.034291144	22.3267	3.4E-24	0.696303	0.834913

Tabela II.22 Resumo dos resultados do modelo IRI_{int} SPN x IRI_{int} SLE nos 42 trechos.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.946952358
R-Quadrado	0.896718768
R-quadrado ajustado	0.894136737
Erro padrão	0.21109554
Observações	42

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	15.47579454	15.47579454	347.2920497
Resíduo	40	1.782453075	0.044561327	
Total	41	17.25824762		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	0.219330801	0.160498228	2.366562137	0.017939547	0.105048	0.54371
Variável X 1	0.923900453	0.049576716	18.63577339	2.51833E-21	0.823702	1.024099

Tabela II.23 Resumo dos resultados do modelo ICP P(o) x IRI médio conf. 95% SPN nos 72 trechos.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.9168895
R-Quadrado	0.84068636
R-quadrado ajustado	0.83841046
Erro padrão	0.47031072
Observações	72

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	81.7050404	81.70504	369.38486
Resíduo	70	15.4834521	0.221192	
Total	71	97.1884926		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	12.9928595	0.50069959	25.94941	1.216E-37	11.99424566	13.9914733
Variável X 1	-0.1190539	0.00619447	-19.2194	1.239E-29	-0.13140837	-0.1066994

Tabela II.24 Resumo dos resultados do modelo ICP P(o) x IRI médio conf. 95% SLD nos 42 trechos.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.94393
R-Quadrado	0.89101
R-quadrado ajustado	0.88828
Erro padrão	0.29396
Observações	42

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	28.26035	28.26035	327.01929
Resíduo	40	3.456719	0.086418	
Total	41	31.71707		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	12.926333	0.529115	24.43011	1.181E-25	11.8569523	13.99571364
Variável X 1	-0.1215146	0.00672	-18.0837	7.403E-21	-0.1350954	-0.10793386

Tabela II.25 Resumo dos resultados do modelo ICP P(o) x IRI médio conf. 95% SLE nos 42 trechos da RMF

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.9137
R-Quadrado	0.8349
R-quadrado ajustado	0.8307
Erro padrão	0.2715
Observações	42

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	14.90818	14.90818	202.2242
Resíduo	40	2.948843	0.073721	
Total	41	17.85703		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	10.155	0.488701	20.77942	4.82E-23	9.167229	11.14263339
Variável X 1	-0.0883	0.006206	-14.2206	3.11E-17	-0.1008	-0.07571413

Tabela II.26 Resumo dos resultados do modelo ICP P(o) x média do IRI para as três posições dos sensores com 95% de confiabilidade dos 42 trechos da RMF

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.9701
R-Quadrado	0.941094
R-quadrado ajustado	0.939621
Erro padrão	0.20481
Observações	42

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	26.806192	26.80619168	639.04835
Resíduo	40	1.6778819	0.041947048	
Total	41	28.484074		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	12.73672	0.3686366	34.55087088	2.097E-31	11.99167	13.4817586
Variável X 1	-0.118347	0.0046816	-25.2794057	3.265E-26	-0.12781	-0.10888525

Tabela II.27 Resumo dos resultados do modelo ATR x IRI para SPN com 95% de conf. nos 72 trechos da RMF

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.05889203
R-Quadrado	0.003468271
R-quadrado ajustado	-0.0107679
Erro padrão	1.176193092
Observações	72

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	0.337036714	0.337037	0.243624
Resíduo	70	96.84011329	1.38343	
Total	71	97.17715		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3.139015527	0.603968867	5.197313	1.91E-06	1.934438	4.343593
Variável X 1	0.041076457	0.083221013	0.493583	0.623146	-0.1249	0.207056

Tabela II.28 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x Trinca de Fadiga nos 72 trechos considerando os três tipos de revestimento

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.683515
R-Quadrado	0.467193
R-quadrado ajustado	0.459357
Erro padrão	0.58072
Observações	70

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	20.10796	20.10796	59.62588
Resíduo	68	22.93201	0.337236	
Total	69	43.03998		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	2.964224	0.081187	36.51102	2.09E-46	2.802217	3.12623
Variável X 1	0.046175	0.00598	7.721779	7.01E-11	0.034243	0.058108

Tabela II.29 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x Trinca de Bloco nos 72 trechos considerando os três tipos de revestimento

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.026932
R-Quadrado	0.000725
R-quadrado ajustado	-0.01355
Erro padrão	1.177811
Observações	72

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	0.070485	0.070485	0.05081
Resíduo	70	97.10666	1.387238	
Total	71	97.17715		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3.44096	0.148339	23.19667	1.39E-34	3.145108	3.736811
Variável X 1	-0.00502	0.022289	-0.22541	0.822317	-0.04948	0.03943

Tabela II.30 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x Remendo nos 72 trechos considerando os três tipos de revestimento

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.582064899
R-Quadrado	0.338799546
R-quadrado ajustado	0.329353825
Erro padrão	0.95807527
Observações	72

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	32.92357	32.92357	35.86805
Resíduo	70	64.25358	0.917908	
Total	71	97.17715		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3.151459993	0.122061	25.81876	1.68E-37	2.908017	3.394903
Variável X 1	0.122667979	0.020482	5.988994	8.19E-08	0.081817	0.163519

Tabela II.31 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito Afundamento nos 72 trechos considerando os três tipos de revestimento

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.275803
R-Quadrado	0.076067
R-quadrado ajustado	0.062868
Erro padrão	1.132539
Observações	72

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	7.39201	7.39201	5.763099
Resíduo	70	89.78514	1.282645	
Total	71	97.17715		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3.359246	0.136612	24.5897	3.64E-36	3.086782	3.63171
Variável X 1	0.419524	0.174755	2.400646	0.019028	0.070987	0.768061

Tabela II.32 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito desgaste nos 72 trechos da RMF considerando os três tipos de revestimento

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.281898
R-Quadrado	0.079466
R-quadrado ajustado	0.066316
Erro padrão	1.130454
Observações	72

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	7.722321	7.722321	6.042854
Resíduo	70	89.45483	1.277926	
Total	71	97.17715		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3.346131	0.137441	24.34598	6.81E-36	3.072014	3.620248
Variável X 1	0.166071	0.067558	2.458222	0.01644	0.031332	0.300811

Tabela II.33 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito (TF + TB) nos 72 trechos da RMF considerando os três tipos de revestimento

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.585893588
R-Quadrado	0.343271297
R-quadrado ajustado	0.333613522
Erro padrão	0.644725071
Observações	70

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	14.77439	14.77439	35.54352
Resíduo	68	28.26559	0.41567	
Total	69	43.03998		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	2.948444561	0.095965	30.72405	1.34E-41	2.756949	3.13994
Variável X 1	0.03649676	0.006122	5.961838	9.91E-08	0.024281	0.048712

Tabela II.34 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito TF nos 42 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,46874052
R-Quadrado	0,219717675
R-quadrado ajustado	0,200210617
Erro padrão	1,158576488
Observações	42

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	15,11899	15,11899	11,2635
Resíduo	40	53,69198	1,342299	
Total	41	68,81096		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	2,674324252	0,247019	10,8264	1,86E-13	2,175081	3,173568
Variável X 1	0,110221933	0,032842	3,356113	0,001742	0,043845	0,176598

Tabela II.35 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito TB nos 42 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.031882968
R-Quadrado	0.001016524
R-quadrado ajustado	-0.02527251
Erro padrão	0.508216965
Observações	40

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	0.009987	0.009987	0.038667
Resíduo	38	9.81481	0.258284	
Total	39	9.824798		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	2.975761381	0.117988	25.22091	2.46E-25	2.736907	3.214615
Variável X 1	0.014458399	0.073527	0.19664	0.845157	-0.13439	0.163307

Tabela II.36 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito REM nos 42 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,855843799
R-Quadrado	0,732468608
R-quadrado ajustado	0,725780324
Erro padrão	0,678400565
Observações	42

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	50,40187	50,40187	109,5152
Resíduo	40	18,40909	0,460227	
Total	41	68,81096		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	2,701311512	0,116924	23,10321	9,54E-25	2,465	2,937623
Variável X 1	0,487125883	0,046548	10,46495	5,12E-13	0,393048	0,581204

Tabela II.37 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito AFUND nos 42 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,012949368
R-Quadrado	0,000167686
R-quadrado ajustado	-0,02482812
Erro padrão	1,311482231
Observações	42

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	0,011539	0,011539	0,006709
Resíduo	40	68,79943	1,719986	
Total	41	68,81096		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3,251025641	0,210005	15,48069	1,73E-18	2,826589	3,675462
Variável X 1	-0,06435897	0,785768	-0,08191	0,93513	-1,65245	1,523737

Tabela II.38 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito DES nos 42 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,128464099
R-Quadrado	0,016503025
R-quadrado ajustado	-0,00937847
Erro padrão	0,504262323
Observações	40

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	0,162139	0,162139	0,637638
Resíduo	38	9,662659	0,25428	
Total	39	9,824798		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	2,97181412	0,083931	35,40783	1,04E-30	2,801905	3,141724
Variável X 1	0,076130474	0,095339	0,798522	0,42953	-0,11687	0,269135

Tabela II.39 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito (TF + TB) nos 42 trechos da RMF com revestimento em CBUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,540889354
R-Quadrado	0,292561294
R-quadrado ajustado	0,273944486
Erro padrão	1,130952026
Observações	40

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	20,10018306	20,10018	15,7149
Resíduo	38	48,60399444	1,279052	
Total	39	68,7041775		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	2,419162976	0,276608478	8,745802	1,23E-10	1,859198	2,979128
Variável X 1	0,122576853	0,030920937	3,964202	0,000314	0,059981	0,185173

Tabela II.40 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito TF nos 20 trechos da RMF com revestimento em TSD

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,773685
R-Quadrado	0,598588
R-quadrado ajustado	0,576288
Erro padrão	0,54532
Observações	20

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	7,982045	7,982045	26,84176
Resíduo	18	5,352735	0,297374	
Total	19	13,33478		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3,506018	0,152326	23,01656	8,41E-15	3,185993	3,826043
Variável X 1	0,034399	0,00664	5,180903	6,29E-05	0,02045	0,048348

Tabela II.41 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito TB nos 20 trechos da RMF com revestimento em TSD

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,339529459
R-Quadrado	0,115280253
R-quadrado ajustado	0,066129156
Erro padrão	0,809579561
Observações	20

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	1,537237	1,537237	2,345426
Resíduo	18	11,79754	0,655419	
Total	19	13,33478		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3,811818182	0,211395	18,03177	5,71E-13	3,367695	4,255942
Variável X 1	0,417954545	0,272909	1,531478	0,143038	-0,15541	0,991316

Tabela II.42 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito REM nos 20 trechos da RMF com revestimento em TSD

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,754164259
R-Quadrado	0,568763729
R-quadrado ajustado	0,544806159
Erro padrão	0,565215829
Observações	20

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	7,584339	7,584339	23,74046
Resíduo	18	5,750441	0,319469	
Total	19	13,33478		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3,59139861	0,149337	24,04889	3,91E-15	3,277652	3,905145
Variável X 1	0,068000244	0,013956	4,872418	0,000122	0,038679	0,097321

Tabela II.43 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito AFUND nos 20 trechos da RMF com revestimento em TSD

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,603631977
R-Quadrado	0,364371564
R-quadrado ajustado	0,329058873
Erro padrão	0,68621204
Observações	20

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	4,858815	4,858815	10,31843
Resíduo	18	8,475965	0,470887	
Total	19	13,33478		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3,815818674	0,161632	23,60803	5,4E-15	3,476242	4,155395
Variável X 1	0,362625169	0,112889	3,212231	0,004831	0,125454	0,599796

Tabela II.44 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito DES nos 20 trechos da RMF com revestimento em TSD

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,631816671
R-Quadrado	0,399192305
R-quadrado ajustado	0,3658141
Erro padrão	0,667151425
Observações	20

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	5,323142	5,323142	11,95967
Resíduo	18	8,011638	0,445091	
Total	19	13,33478		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3,791168611	0,158759	23,87998	4,42E-15	3,457628	4,12471
Variável X 1	0,150265111	0,043451	3,458276	0,002805	0,058978	0,241552

Tabela II.45 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito (TF + TB) nos 20 trechos da RMF com revestimento em TSD

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,772285083
R-Quadrado	0,59642425
R-quadrado ajustado	0,574003375
Erro padrão	0,546788292
Observações	20

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	7,953186155	7,953186	26,60129
Resíduo	18	5,381593845	0,298977	
Total	19	13,33478		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3,501585475	0,1533527	22,83354	9,67E-15	3,179403	3,823768
Variável X 1	0,033739542	0,006541658	5,157644	6,61E-05	0,019996	0,047483

Tabela II.46 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito TF nos 10 trechos da RMF com revestimento em AAUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,883921864
R-Quadrado	0,781317861
R-quadrado ajustado	0,753982594
Erro padrão	0,420845503
Observações	10

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	5,062323	5,062323	28,58278
Resíduo	8	1,416888	0,177111	
Total	9	6,47921		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	2,74125	0,148791	18,42345	7,76E-08	2,398137	3,084363
Variável X 1	0,118583333	0,022181	5,346286	0,000689	0,067435	0,169732

Tabela II.47 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito TB nos 10 trechos da RMF com revestimento em AAUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,05562899
R-Quadrado	0,00309458
R-quadrado ajustado	-0,12151859
Erro padrão	0,89855158
Observações	10

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	0,02005	0,02005	0,024834
Resíduo	8	6,45916	0,807395	
Total	9	6,47921		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3,13126877	0,35781	8,751194	2,28E-05	2,306156	3,956381
Variável X 1	-0,0032329	0,020515	-0,15759	0,878687	-0,05054	0,044075

Tabela II.48 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito REM nos 10 trechos da RMF com revestimento em AAUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,010559854
R-Quadrado	0,000111511
R-quadrado ajustado	-0,12487455
Erro padrão	0,899894959
Observações	10

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	0,000723	0,000723	0,000892
Resíduo	8	6,478488	0,809811	
Total	9	6,47921		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3,10125	0,318161	9,747426	1,03E-05	2,36757	3,83493
Variável X 1	-0,02125	0,711429	-0,02987	0,976903	-1,66181	1,619309

Tabela II.49 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito AFUND nos 10 trechos da RMF com revestimento em AAUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	1,17082E-08
R-Quadrado	1,37081E-16
R-quadrado ajustado	-0,11111111
Erro padrão	0,848476412
Observações	10

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	8,88E-16	8,88E-16	0
Resíduo	9	6,47921	0,719912	
Total	10	6,47921		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3,097	0,268312	11,54254	1,07E-06	2,490037	3,703963
Variável X 1	0	0	65535	#NÚM!	0	0

Tabela II.50 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito DES nos 10 trechos da RMF com revestimento em AAUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	1,17082E-08
R-Quadrado	1,37081E-16
R-quadrado ajustado	-0,11111111
Erro padrão	0,848476412
Observações	10

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	8,88E-16	8,88E-16	0
Resíduo	9	6,47921	0,719912	
Total	10	6,47921		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	3,097	0,268312	11,54254	1,07E-06	2,490037	3,703963
Variável X 1	0	0	65535	#NÚM!	0	0

Tabela II.51 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x defeito (TF + TB) nos 10 trechos da RMF com revestimento em AAUQ

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,743887358
R-Quadrado	0,553368402
R-quadrado ajustado	0,478929802
Erro padrão	0,693369141
Observações	8

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	3,573923	3,573923	7,433891
Resíduo	6	2,884565	0,480761	
Total	7	6,458488		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	2,386941624	0,358792	6,652719	0,000557	1,509009	3,264874
Variável X 1	0,095241117	0,034931	2,726516	0,034344	0,009767	0,180715

Tabela II.52 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x Deflexão nos 72 trechos da RMF.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.584720932
R-Quadrado	0.341898568
R-quadrado ajustado	0.332220606
Erro padrão	0.645398538
Observações	70

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	14.71531	14.71531	35.32754
Resíduo	68	28.32467	0.416539	
Total	69	43.03998		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	1.45907619	0.317463	4.59605	1.92E-05	0.825588	2.092564
Variável X 1	0.0462377	0.007779	5.943697	1.07E-07	0.030714	0.061761

Tabela II.53 Resumo dos resultados do modelo IRI médio conf. 95% x NEC nos 72 trechos da RMF.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.57423
R-Quadrado	0.32974
R-quadrado ajustado	0.319584
Erro padrão	0.658842
Observações	68

ANOVA				
	gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	1	14.094	14.094	32.46923
Resíduo	66	28.64878	0.434072	
Total	67	42.74278		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	6.359273	0.542696	11.71792	8.88E-18	5.275745	7.442801
Variável X 1	-0.52086	0.091408	-5.69818	3.06E-07	-0.70336	-0.33836

Tabela II.54 Resumo do Modelo de Regressão Múltipla do IRI Médio Conf. com ICP, Defl e TF.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,927
R-Quadrado	0,859
R-quadrado ajustado	0,853
Erro padrão	0,448
Observações	72

ANOVA				
	Gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	3	83,499	27,833	138,373
Resíduo	68	13,678	0,201	
Total	71	97,177		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	15,636	1,019	15,345	0,000	13,603	17,669
Defl. X1	-0,0211	0,007	-2,854	0,006	-0,036	-0,006
ICP P(0)	-0,141	0,010	-14,450	0,000	-0,160	-0,121
TF (%)	-0,00641	0,006	-2,098	0,021	-0,018	0,005

Tabela II.55 Resumo do Modelo de Regressão Múltipla correlacionando o ICP com o IRI Médio Conf., com o NEC e TF.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,964
R-Quadrado	0,930
R-quadrado ajustado	0,927
Erro padrão	2,441
Observações	72

ANOVA				
	Gl	*SQ*	*MQ*	*F*
Regressão	3	5.359,13	1.786,37	299,66
Resíduo	68	405,377	5,961	
Total	71	5.764,50		

	Coeficientes	*Erro padrão*	*Stat t*	*valor-P*	*95% inferiores*	*95% superiores*
Interseção	101,844	2,091	48,714	0,001	97,672	106,016
IRI médio	-8,303	0,376	-22,073	0,000	-9,053	-7,552
TF (%)	-4,924E-02	0,031	-3,582	0,013	-0,0790	-0,0194
NEC	0,812	0,279	2,914	0,005	0,256	1,368